

# ***Atualização de uma Impressora 3D FDM tipo Delta***

*Raquel Maria Barroso Costa*

## **Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof. Jorge Lino

Orientador no INEGI: Eng. Santiago Castellanos

Co-Orientador: André Brandão



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho 2019



*À minha família*



# Resumo

Atualmente a impressão 3D é já uma realidade no mundo industrial. Desta forma, é cada vez mais importante a realização de estudos que contribuam para o desenvolvimento tecnológico e melhoria de equipamentos e materiais utilizados na impressão do produto.

Neste estudo foi proposta a realização da avaliação de uma impressora 3D FDM tipo Delta existente no Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços da FEUP, com o objetivo de se desenvolver e melhorar a versatilidade e qualidade de impressão da mesma. Foi realizada uma avaliação de todos os sistemas constituintes da impressora, começando-se por imprimir várias peças teste, de modo a que fosse mais perceptível e transparente a deteção da origem de erros.

A avaliação das peças impressas permitiu verificar que a origem dos erros derivava do sistema de controlo da impressora e do sistema de extrusão. Posto isto, substituiu-se a placa de controlo existente por uma com maior capacidade de processamento, com *stepper drivers* de maior resolução, e que permite acoplamentos futuros de outros sistemas complementares. Alterou-se, ainda, o mecanismo de extrusão para a resolução dos problemas de escorregamento encontrados.

Por fim, foram realizadas algumas peças de comparação com o estado inicial da impressora e peças que testam a sua principal funcionalidade.

Concluiu-se que a alteração do sistema de extrusão e do sistema de controlo levou a uma grande melhoria nos resultados de impressão. Conseguiu-se imprimir uma peça com as dimensões máximas da impressora (Ø200x600 mm) o que não tinha sido possível anteriormente. Foi testada a mistura de cores, embora sendo ainda necessário um estudo mais aprofundado desta funcionalidade relacionada com o extrusor *Diamond Hotend*.

A alteração da localização do sistema de controlo favoreceu positivamente o controlador pois este passou a provocar menos erros e tem a vantagem de ser de fácil acesso, sem ter a necessidade de provocar a descalibração da base de impressão. O projeto de uma nova caixa é uma mais valia para todo o sistema eletrónico.

A realização da digitalização 3D da base de impressão mostrou que esta se encontrava deformada e que tanto o material utilizado como o sistema de fixação provocavam deformações consideráveis quando se realizava o aquecimento da mesma.

Apesar dos resultados obtidos, serão ainda necessárias alterações mais aprofundadas para alcançar a qualidade obtida em impressoras cartesianas.



# Upgrading of a Delta FDM 3D Printer

## Abstract

Currently, 3D printing is already a reality in the industrial world. In this way, it is increasingly important to carry out studies that contribute to the technological development and improvement of equipment and materials used in product printing.

In this study, it was proposed to do an evaluation of a 3D FDM Delta printer in “Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviço” of FEUP, with the main objective of development and improvement of the 3D printer and printing quality. An evaluation of all the constituent systems of the printer was carried out, starting by printing several test pieces in order to show clearly the errors. So, it would be possible to exhibit all the problems contained in every printer system.

The evaluation of the printed parts reflects the origin of the errors and make sure that they came from the control system of the printer and the extrusion system. The existing control board was replaced by one with higher processing capacity, higher stepper driver’s resolution, and allowing future couplings of other complementary systems. The extrusion mechanism was also modified to solve the problems of slipping filament encountered.

Finally, a few pieces were made to compare with the initial state of the printer that prove the better functionality of the printer. It was concluded that the alteration of the extrusion system and the control system led to a great improvement in the final printing results.

It was possible to print a part with the maximum dimensions of the printer ( $\varnothing 200 \times 600\text{mm}$ ) which had not been possible, previously. The color mixing was tested, although a further study of this functionality related to the Diamond Hotend extruder is still necessary.

The change in the location of the control system has positively favored the controller since it has caused fewer errors and has the advantage of being easily accessible, without altering the bed calibration. The design of a new box is essential for the entire electronic system.

The 3D scanning of the printing base showed that it was deformed and that both the material used, and the fastening system caused considerable deformations when the heating was performed.

Despite the results obtained, further changes will be necessary to achieve the quality obtained in Cartesian printers.





# Agradecimentos

Após cinco anos no curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica e de um semestre da realização da dissertação ficam pessoas às quais eu devo um muito obrigado.

Gostaria de agradecer aos professores que contribuíram para a aquisição de todos os conhecimentos sobre mecânica, em especial, ao professor Jorge Lino pela oportunidade de oferecer o tema de dissertação relacionado com a impressão 3D e por toda a disponibilidade e atenção demonstrada para este projeto e pela orientação e conselhos prestados ao longo deste.

Agradeço ao Engenheiro Santiago Castellanos, que esteve sempre presente, que seguiu todo o projeto e que deu críticas construtivas que impulsionaram todos o trabalho realizado, pelo conhecimento transmitido sobre a impressora, todos os pormenores que implicavam o manuseamento desta e, ainda, por todo o material prestado.

Agradeço ao André Brandão pois foi ele que seguiu mais de perto todos os procedimentos, que através da experiência obtida anteriormente com a mesma impressora transmitiu a informação necessária ao manuseamento e soube ajudar e orientar da forma mais eficaz todos os objetivos propostos. Por último, por todas as ferramentas que lhe pertenciam e que foram essenciais para recompor todos os componentes utilizados.

Agradeço a todos os colegas do LDPS que estavam presentes todos os dias e seguiram todo o desenvolvimento, transmitindo os conhecimentos sobre impressão 3D e toda a ajuda que foi essencial no desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao Leonardo Santana, ao Edwin Garzón, ao Marco Marques, à Catarina Maia, ao João Afonso e ao Hugo Semião.

Agradeço ao Bruno por toda a atenção que me deu, pela ajuda, companhia e, essencialmente, pela persistência que me proporcionou coragem para arriscar e avançar com as decisões tomadas durante esta dissertação.

Um agradecimento especial aos meus pais que proporcionaram todas as condições para realizar este curso e que me apoiaram em qualquer decisão que eu tomasse, mesmo que isso implicasse a distância. Por todo o carinho e paciência e pelos valores que transmitiram e que fizeram a pessoa que sou hoje. Às minhas irmãs pelos momentos de descontração e de brincadeira.

A todos os meus amigos, aos amigos da minha terra natal de Barcelos – Anabela, Catarina, Joana, Andreia, Dany, Sónia e Tatiana - àqueles que conheci na faculdade e que me ajudaram nos momentos de maior agitação, em particular à Beatriz, à Filipa, à Patrícia, ao Emanuel, ao Mauro e aos restantes membros do grupo *Tertúlias*.

Agradecimento ao financiamento do Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



# Índice de Conteúdos

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introdução.....   | 1  |
| 1.1   | Enquadramento do projeto e motivação.....                       | 1  |
| 1.2   | Objetivos do projeto.....                                       | 1  |
| 1.3   | Método seguido no projeto .....                                 | 2  |
| 1.4   | Estrutura da dissertação .....                                  | 3  |
| 2     | Estado da Arte .....  | 5  |
| 2.1   | Contextualização da impressão 3D.....                           | 5  |
| 2.2   | Processo FDM.....   | 6  |
| 2.3   | Impressora tipo Delta.....                                      | 7  |
| 2.4   | Extrusor Diamond Hotend .....                                   | 10 |
| 2.5   | Materiais .....   | 13 |
| 2.6   | Softwares de CAM e de controlo.....                             | 16 |
| 2.7   | Placa de controlo.....  | 18 |
| 2.8   | Parâmetros de impressão.....                                    | 19 |
| 2.9   | Impressora Delta do LDPS .....                                  | 21 |
| 2.9.1 | Apresentação cronológica do desenvolvimento da impressora ..... | 21 |
| 2.9.2 | Estado atual da impressora.....                                 | 23 |
| 3     | Metodologia: Análise da impressora 3D.....                      | 27 |
| 3.1   | Filamento de PLA de três cores .....                            | 27 |
| 3.2   | Configuração e calibração da impressora .....                   | 28 |
| 3.3   | Observação das impressões realizadas.....                       | 31 |
| 3.4   | Escorregamento no sistema de extrusão .....                     | 36 |
| 3.5   | Estudo sobre controladores .....                                | 38 |
| 3.6   | Análise da deformação da base de impressão .....                | 42 |
| 4     | Desenvolvimento: Solução proposta.....                          | 45 |
| 4.1   | Secagem do PLA.....   | 45 |
| 4.2   | Sistema de extrusão.....  | 46 |
| 4.3   | Parte estrutural .....  | 48 |
| 4.4   | Sistema de controlo.....  | 51 |
| 4.4.1 | Configuração do novo <i>Firmware</i> .....                      | 53 |
| 4.4.2 | Calibração .....  | 55 |
| 4.5   | Parâmetros de impressão.....                                    | 56 |
| 4.6   | Módulo da base de impressão .....                               | 59 |
| 5     | Resultados .....  | 61 |
| 5.1   | Comparação das peças realizadas .....                           | 61 |
| 5.2   | Definição dos parâmetros de extrusão adequados .....            | 63 |
| 5.3   | Análise da peça impressa com o volume de impressão .....        | 64 |
| 5.4   | Objetos impressos multicolor .....                              | 66 |
| 5.5   | Mistura de cor .....  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| 5.6 Estado final da Impressora.....                   | 68 |
| 6 Conclusões .....                                    | 69 |
| 7 Trabalhos Futuros.....                              | 71 |
| Referências .....                                     | 73 |
| ANEXO A: Ficha técnica do filamento utilizado.....    | 77 |
| ANEXO B: Montagem do sistema de extrusão.....         | 79 |
| ANEXO C: Caixa de armazenamento dos componentes ..... | 81 |
| ANEXO D: Ficha AWG .....                              | 85 |
| ANEXO E: Ficha técnica do Filamento PM.....           | 87 |
| ANEXO F: Alterações no bloco .....                    | 89 |
| ANEXO G: Suporte de ecrã.....                         | 91 |
| ANEXO H: Interface de trabalho da DUET .....          | 93 |

## Siglas

3D - Tridimensional

ABS – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

AIMMAP - Associação dos Industriais Metalúrgicos Metalomecânicos e Afins de Portugal

AMF – *Additive Manufacturing File Format*

ASA - Acrilato de Acrilonitrilo Estireno

AWG - *American Wire Gauge*

CAD - *Computer Aided Design*/Desenho Assistido por Computador

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numeric Control*

DSC - *Differential Scanning Calorimeter*

DTA - *Differential Thermal Analysis*

FA - Fabrico Aditivo

FDM – *Fused Deposition Modeling*

FDM - *Fused Deposition Modeling*/ Modelação por Extrusão de Plástico

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FPE - *Flexibel PolyEster*

FTIR - *Fourier-transform infrared spectroscopy*

HIPS - *High Impact Polystyrene*

HIPS – Poliestireno de alto impacto

IP – *Internet Protocol*

LCD – *Liquid Crystal Display*

LDPS - Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços

LED - *light-emitting diode*

PC - Policarbonato

PET – Polietileno Teraftalato

PETG – Polietileno Teraftalato modificado com Glicol

PLA – Ácido Polilático

PMMA - Acrílico ou polimetil-metacrilato

PP - Polipropileno

PTFE - Politetrafluoretileno

PVA – Acetato de Polivinila

PVA – Acetato de Polivinilo

RADDS - *RepRap Arduino-Due Driver Shield*

RAMBo - *RepRap Arduino-Mega-compatible Mother Board*

RAMPS - *RepRap Arduino Mega Polulu Shield*

*SLi - Slice file*

STL – *Standard Triangle Language*

TPU – Poliuretano Termoplástico

USB - *universal serial bus*

XRD - *X-ray diffraction*

## *Lista de Símbolos*

$P_{cr}$  - Pressão crítica.

$d$  - Diâmetro do filamento.

$E$  - Módulo de elasticidade do material.

$h$  - Altura de camada.

$L$  - Comprimento de filamento entre o extrusor e o bico extrusor.

$l$  - Largura de deposição.

$P$  – Potência.

$Q$  - Caudal volúmico.

$R$  - Raio da polia.

$\alpha$  – Ângulo.

$\Gamma$  - Binário necessário para extrusão do material.

$v$  - Velocidade de avanço linear do filamento.

$\omega$  - Velocidade angular.





# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Distribuição dos investimentos das organizações. Adaptado de Wohlers (2019). .....   | 5  |
| Figura 2 - Processo de formação de uma peça impressa por FDM. ....  | 7  |
| Figura 3 - Principais componentes de funcionamento de uma impressora tipo Delta. ....   | 9  |
| Figura 4 - Cinemática de uma impressora tipo Delta. Adaptado de Bell (2015). ....   | 10 |
| Figura 5 - <i>Diamond Hotend</i> . ....   | 11 |
| Figura 6 - Espectro criado com a combinação das três cores primárias (RepRap.org 2018). ....  | 11 |
| Figura 7 - Peça realizada sem torre de purga. ....  | 12 |
| Figura 8 – Peça e torre de purga realizada pelo Palette+ do LDPS. ....  | 12 |
| Figura 9 - Influência das condições de armazenamento e temperatura de operação no acabamento superficial (Ana Pilar Valerga, Moisés Batista, e Girot 2018). ....  | 14 |
| Figura 10 - Resultados de XRD compostas para diferentes cores de PLA por ordem decrescente de cristalinidade, com as percentagens mais altas na parte superior. Cores: (A) branco, (B) azul, (C) cinza, (D) preto e (E) natural (Wittbrodt e Pearce 2015). .... | 15 |
| Figura 11 - Demonstração da janela tipo do Programa Slic3r. ....  | 17 |
| Figura 12 - Definição da temperatura do PLA de acordo com a velocidade de impressão (Filament2Print 2018). ....   | 20 |
| Figura 13 - Máquina Delta desenvolvida inicialmente (Abreu 2017). ....  | 21 |
| Figura 14 - Alterações efetuadas e otimização da impressora (Regadas 2017). ....  | 22 |
| Figura 15 – a) Ensaio de flexão b) Imagem microscópica de uma amostra (Brandão 2018). ....  | 22 |
| Figura 16 - Estrutura do efector a) Antes das alterações b) Após alterações. ....   | 23 |
| Figura 17 - Impressora FDM do tipo Delta do LDPS. ....  | 24 |
| Figura 18 - Prateleira isolada para os filamentos. ....   | 25 |
| Figura 19 - Arquitetura da impressora 3D do tipo Delta (Abreu 2017). ....   | 25 |
| Figura 20 - Filamentos de PLA utilizados. ....  | 28 |
| Figura 21 - Alterações efetuadas nos <i>steps</i> por mm do extrusor no <i>software Marlin</i> . ....   | 28 |
| Figura 22 - Alterações das características geométricas da impressora efetuadas no <i>software Marlin</i> . ....   | 29 |
| Figura 23 - Correção do nível da base de impressão. ....  | 29 |
| Figura 24 - Cubo 20 mm com filamento de cor ciano. ....   | 32 |
| Figura 25 - Cubo XYZ com multiplicador de extrusão de 1.1 (iDig3Dprinting 2016). ....   | 32 |
| Figura 26 Cubo XYZ 20 mm multiplicador de extrusão 0.9 (iDig3Dprinting 2016). ....  | 32 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 27 - Cubo XYZ com defeitos de borra (iDig3Dprinting 2016). .....  | 33 |
| Figura 28 - Calibrador de impressoras Delta (dolpin 2015).....   | 33 |
| Figura 29 - Cubo XYZ 20 mm com filamento cor magenta (iDig3Dprinting 2016).....  | 33 |
| Figura 30 - Cubo XYZ 20 mm com filamento cor amarela (iDig3Dprinting 2016).....  | 34 |
| Figura 31 - Paralelepípedo de três cores.....  | 34 |
| Figura 32 - Falha em paralelepípedo de três cores. ....  | 34 |
| Figura 33 – Vaso Júlia interrompido (virtox 2012).....   | 34 |
| Figura 34 – Desalinhamento nas torres de purga. ....   | 35 |
| Figura 35 - Vaso Starelt interrompido (David_Mussaffi 2016). ....  | 35 |
| Figura 36 - Esquema representativo do aumento do binário. ....   | 38 |
| Figura 37 – Conjunto do <i>Arduino</i> , <i>RAMPS</i> 1.4 e placa de extensão. ....                                      | 39 |
| Figura 38 – Diagrama da placa <i>Duet 2 Ethernet v1.03</i> ou superior (Dozuki 2019).....                                | 40 |
| Figura 39 - Deformação da mesa à temperatura ambiente – 23 °C. ....  | 43 |
| Figura 40 - Deformação da mesa à temperatura de trabalho do PLA – 60 °C. ....  | 43 |
| Figura 41 - Deformação da mesa à temperatura de trabalho do ABS – 100 °C. ....   | 44 |
| Figura 42 - Ordem de trabalhos.....  | 45 |
| Figura 43 - Forno utilizado para realizar os tratamentos térmicos. ....  | 46 |
| Figura 44 - Parte do extrusor (Technologies 2019).....   | 47 |
| Figura 45 - Sistema planetário (VanessaE 2016). ....   | 47 |
| Figura 46 - Sistema de extrusão aplicado nos três extrusores. ....   | 47 |
| Figura 47 - Caixa projetada para inserção de todos os componentes relativos ao sistema de controlo e à alimentação. .... | 48 |
| Figura 48 – Fios de ligações com vários pontos de soldadura. ....  | 49 |
| Figura 49 - Fichas microfone de 4 ligações.....  | 49 |
| Figura 50 - Bloco de ligação de perfis a) antes da alteração, b) após alteração. ....                                    | 50 |
| Figura 51 - Suporte de ecrã instalado. ....  | 51 |
| Figura 52 - Placa <i>Duet 2 Ethernet</i> , <i>Duex5</i> e <i>PanelDue</i> (Dozuki 2019).....                             | 52 |
| Figura 53 - Esquema de ligações elétricas entre componentes e a placa. Adaptado de (Dozuki 2019).....                    | 52 |
| Figura 54 - Alteração do IP da placa de controlo. ....   | 53 |
| Figura 55 - Código realizado para criar uma ferramenta de mistura formando a cor verde. ....                             | 54 |
| Figura 56 - Peças de calibração necessárias para obter os valores finais. Peças de dolpin (2015). ....                   | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 57 - Cubo de 20 mm para realização de estudo do multiplicado de extrusão.....  | 57 |
| Figura 58 - Estudo de diferentes distâncias e velocidades de retração.....  | 57 |
| Figura 59 - Peças a realizar com a impressora. ....   | 59 |
| Figura 60 - Base de impressão com vidro de borosilicato.....  | 59 |
| Figura 61 - Comparação do cubo XYZ de cor ciano, a) antes, b) depois. Peças de iDig3Dprinting (2016).....   | 61 |
| Figura 62 - Comparação do cubo XYZ de cor magenta, a) antes, b) depois. Peças de iDig3Dprinting (2016).....   | 62 |
| Figura 63 - Comparação do cubo XYZ de cor amarela, a) antes, b) depois. Peças de iDig3Dprinting (2016).....   | 62 |
| Figura 64 - Comparação de uma torre de purga de três cores, a) antes, b) depois.....  | 62 |
| Figura 65 - Comparação de duas peças semelhantes realizadas por, a) Joaquim Regadas, b) Raquel Costa.....   | 63 |
| Figura 66 – Várias perspectivas das amostras de avaliação de parâmetros. Peças de iDig3Dprinting (2016).....  | 64 |
| Figura 67 - Vaso cilíndrico de dimensões $\varnothing 180 \times 550mm$ . ....  | 65 |
| Figura 68 - Problemas encontrados na realização do vaso cilíndrico.....   | 65 |
| Figura 69 - Vaso de duas cores.....   | 66 |
| Figura 70 - Globo de duas cores (m6mafia 2011). ....  | 67 |
| Figura 71 - Torre de mistura de cor a1) parte de trás a 190 °C, a2) parte de trás a 210°C, b1) parte da frente a 190 °C, b2) parte da frente a 210 °C. .... | 68 |
| Figura 72 - Imagem resumo do trabalho realizado.....  | 68 |



# Índice de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Parâmetros dimensionais de uma impressora tipo Delta (Bell 2015) .....                          | 9  |
| Tabela 2 - Características geométricas da impressora.....  | 24 |
| Tabela 3 - Comandos utilizados na calibração da impressora.....  | 31 |
| Tabela 4 - Análise das impressões realizadas.....  | 32 |
| Tabela 5 - Comparação de propriedades entre vários tipos de placas de controlo<br>(3DAddicted 2018a) ..... | 42 |
| Tabela 6 - Soluções encontradas para o sistema de extrusão .....   | 47 |
| Tabela 7 - Valores de ajuste do PID .....  | 54 |
| Tabela 8 - Valores obtidos na primeira peça de calibração .....  | 55 |
| Tabela 9 - Valores obtidos para a ultima peça de calibração .....  | 56 |
| Tabela 10 - Definição das amostras.....  | 58 |



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Após a realização de três diferentes dissertações, nos anos letivos de 2016/17 e 2017/18 foi possível conceber uma impressora FDM tipo Delta, otimizar o funcionamento da mesma e iniciar o processo de impressão de três cores em simultâneo. Por conseguinte, a presente dissertação vai dar continuidade às várias experiências realizadas anteriormente com este tipo de máquina.

Assim, realizou-se um diagnóstico inicial à impressora e avaliou-se os problemas referidos nas dissertações anteriores. Baseando-se nisto, foi possível detetar alguns problemas que impediam a realização de peças com a qualidade final desejada. Pretende-se melhorar parte do funcionamento da impressora, atualizando todas as unidades necessárias e corrigindo alguns problemas, para desta forma, realizar-se a impressão em simultâneo de três materiais de cores diferentes com boa qualidade superficial.

Acrescido ao objetivo principal, esta dissertação proporcionou a capacidade de compreender os conceitos básicos de impressão 3D, a aquisição de conhecimentos acerca de impressoras do tipo Delta, permitiu realizar uma avaliação qualitativa de peças impressas por FDM, bem como desenvolver outros conhecimentos para além do âmbito do Mestrado de Produção, Conceção e Fabrico, em que a dissertação está inserida.

## 1.2 Objetivos do projeto

Após a verificação das dissertações realizadas anteriormente foi possível identificar alguns pontos a serem melhorados:

- Mistura de cor utilizando outra possibilidade de *software* e/ou de *firmware*;
- Instrumentação do bico extrusor para otimizar o processo de impressão;
- Modificação do *layout* no interior da base da impressora, principalmente a disposição da fonte de alimentação devido à proximidade com as ligações eletrónicas. Isto implica uma alteração da localização do módulo de energia colocando-o separadamente da base da impressora.

A isto acrescenta-se uma avaliação da impressora, confirmação dos problemas ocorridos anteriormente e enumeração de novos problemas encontrados. Assim sendo, esta dissertação irá incidir-se sobre os seguintes objetivos:

- Realizar a calibração da impressora;
- Analisar e verificar os protótipos impressos;
- Dar solução aos problemas encontrados;
- Executar trabalhos futuros referidos em dissertações anteriores;
- Implementar as soluções encontradas para solucionar os erros de impressão;
- Verificar as impressões após as alterações realizadas;
- Testar o volume de impressão através da realização de uma peça com as dimensões limite da impressora;
- Testar e avaliar a impressão de peças multicolor.

Em suma, a dissertação tem como principal objetivo dar resposta aos problemas observados por intermédio da alteração da placa de controlo, com a finalidade de conseguir avaliar a influência do novo sistema de controlo na impressão de peças.

### **1.3 Método seguido no projeto**

Inicialmente, esta dissertação teve como objetivo realizar a impressão com mistura de cores. Começou-se por realizar um estudo do funcionamento das impressoras tipo Delta, com auxílio das dissertações anteriormente realizadas, seguido de um estudo do *firmware Marlin*, utilizado para a programação da máquina.

A metodologia desta dissertação implicou uma primeira abordagem teórica acerca da impressão FDM, seguida do estudo de vários componentes que compõem o sistema de funcionamento de uma impressora tipo Delta. Realizou-se também um breve estudo das dissertações realizadas com a impressora utilizada. Isto implicou uma análise acerca do processo de construção e seleção dos componentes da impressora, as formas de melhoria e avaliação das propriedades mecânicas de provetes multicolor.

Iniciou-se a avaliação da impressora recorrendo a uma série de impressões compostas por uma cor e até um máximo de três cores. Estas impressões apresentavam vários defeitos tanto de acabamento, desalinhamento, de baixa precisão e ainda de retração que foram já enunciados em dissertações anteriores. Isto levou a concluir que iria ser necessário realizar algumas alterações e atualizações nos diferentes sistemas da impressora, de forma a solucionar o mais eficientemente possível os erros encontrados.

Assim sendo, e com o objetivo de tentar reparar os erros, foram colocadas determinadas questões que visam estimular todos os problemas de extrusão, de retração e de mau acabamento. Assim deliberou-se a possibilidade de imprimir uma peça segundo as máximas dimensões volumétricas da impressora ( $\varnothing 200 \times 600mm$ ). Todas estas questões levaram ao desenvolvimento da dissertação proposta.

Após uma intensa análise de soluções com vista à melhoria do sistema de funcionamento, realizaram-se alterações a nível do controlador, do sistema de extrusão, e ainda a nível estrutural. Estas soluções têm a finalidade de possibilitar uma impressão de melhor qualidade.



## 1.4 Estrutura da dissertação

### 1.Estado d'Arte

- Contextualização da impressão 3D FDM, mais precisamente de impressoras do tipo Delta, do seu funcionamento e do estudo dos mais variados componentes, *softwares* e parâmetros;
- Estudo do conceito e das características de placas de controlo utilizadas em impressão 3D;
- Avaliação das dissertações anteriormente realizadas sobre a impressora em questão.

### 2. Metodologia - Análise da Impressora

- Análise e configuração inicial para uma primeira abordagem da impressora. Assim, realizou-se a impressão de vários protótipos, estudou-se os possíveis erros existentes na mesma, e ainda, apontou-se possíveis soluções;
- Listagem das soluções existentes para avaliação da melhor forma de resolução da fonte de problemas de cada um dos sistemas.

### 3. Desenvolvimento e Solução

- Escolha e implementação da melhor solução considerada para solucionar os problemas encontrados.

### 4. Resultados

- Apresentação de todas as impressões realizadas e análise contrutiva das mesmas.

### 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

- Avaliação global do trabalho apresentado e comentário dos resultados obtidos, tendo em vista algumas atividades a realizar, para melhoria e estudo da impressora Delta.



## 2 Estado da Arte

### 2.1 Contextualização da impressão 3D

Na perspetiva do programa 2020, o governo português tem investido cada vez mais em investigação, para desta forma aumentar a implementação de tecnologias de fabrico aditivo (FA). Várias empresas portuguesas foram motivadas a criar a sua própria tecnologia de FA, como é exemplo a Adira e Beeverycreative que já possuem máquinas de impressão 3D e outras como a Optima, CEI, Matceramica, Costa Nova e Biosafe que ainda estão na fase de desenvolvimento da tecnologia (Wohlers 2019).

Projetos como o Tooling4G têm o objetivo de dar resposta às indústrias portuguesas que se inserem essencialmente na tecnologia de moldes. Assim, este projeto incorpora logísticas da indústria 4.0, aposta na robótica cooperativa, visa a produção com zero defeitos e implementa o FA de forma a fornecer o produto ao cliente de acordo com a ideologia *just-in-time*. Desta mesma ideologia, surge também o programa *PRODUTECH SIF* que cobre os custos do investimento em várias empresas em tecnologias de FA, juntamente com outras para desenvolver novos sistemas de produção. O projeto *Add.Additive* também surge em âmbito universitário na pesquisa de FA utilizando metais, polímeros, cerâmicos, cimentos, compósitos e metais cerâmicos (Wohlers 2019).

Numa perspetiva a nível mundial, é possível analisar pela Figura 1, a gama de aplicações em que as organizações utilizam os processos de FA. Verifica-se assim que as peças de uso final e os protótipos finais correspondem à maior parte das aplicações.

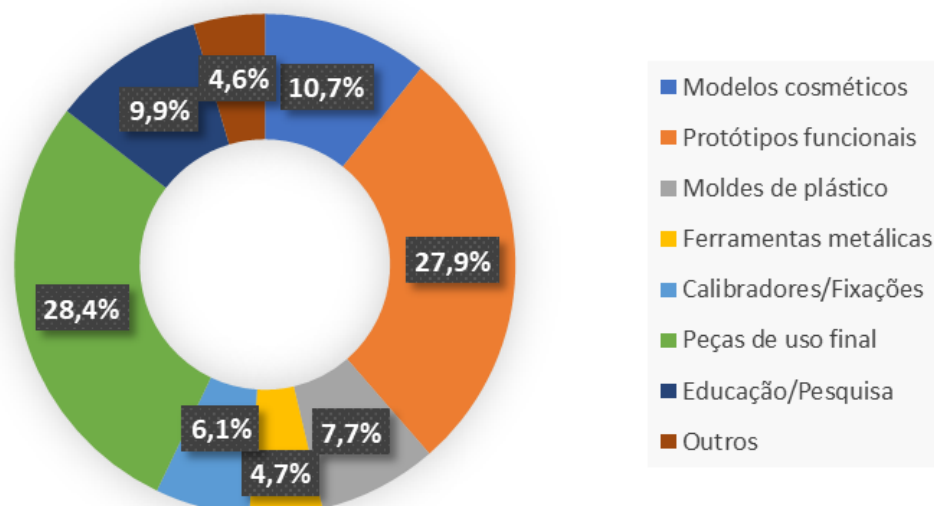


Figura 1 Distribuição dos investimentos das organizações. Adaptado de Wohlers (2019).

Hoje-em-dia têm surgido cada vez mais processos de fabrico aditivo, isto é, a produção rápida e eficaz de modelos físicos através de modelos CAD. O FA é um processo que se tem destacado como sendo o mais rápido na criação de modelos únicos, e ainda, com a vantagem de os modelos produzidos apresentarem boa qualidade de produção.

Este processo de fabrico está normalmente direcionado para máquinas industriais que utilizam a estereolitografia, a sinterização seletiva a laser e impressoras 3D de modelação por extrusão. Esta tecnologia baseia-se no fabrico de peças construídas em camadas finas, na ordem da décima de milímetro (Relvas 2018).

## **2.2 Processo FDM**

O fabrico aditivo pode ser implementado com diferentes técnicas assim como em vários tipos de máquinas. Isto difere essencialmente no tipo de material utilizado e no método de criação das camadas, que influenciará posteriormente nos vários parâmetros tais como: a qualidade da peça final, as propriedades mecânicas, o tempo de produção, e ainda o custo final da peça.

Tal como qualquer tipo de processo de fabrico, a impressão 3D tem as suas vantagens e desvantagens, pelo que se destaca essencialmente por apresentar um baixo custo na produção de pequenas séries, não requerer montagem de componentes, ser de fácil produção, permitir desenvolver e melhorar o produto, apresentar menor tempo na produção de peças complexas, e também ser um processo praticamente automatizado. No entanto, este processo possui uma baixa velocidade de construção e apresenta limites dimensionais na peça a construir dependendo do tipo de máquina. A variedade de materiais compatíveis com as impressoras 3D é restrito, a qualidade superficial obtida necessita em muitos casos de acabamento (pós-processamento) e a resistência mecânica é menor quando comparado com os processos convencionais (Relvas 2018).

Dada a grande variedade de processos de fabrico aditivo, este estudo irá incidir-se na tecnologia de modelação por extrusão e deposição de plástico (FDM). Neste processo o material é normalmente um termoplástico, como é o caso do PLA ou do ABS. Podem ser ainda extrudidos compósitos ou metais. O material a ser extrudido encontra-se em forma de fio com dimensões normalizadas, este ao passar através do bico extrusor é aquecido acima da sua temperatura de transição vítrea para que seja fundido e depositado. A trajetória percorrida pelo bico extrusor e/ou pela base de impressão irá ditar a forma da peça à medida que o material é depositado, sendo esta trajetória realizada camada a camada até se formar o objecto final (Volpato 2017).

A tecnologia FDM é bastante procurada, uma vez que é acessível a qualquer tipo de utilizador, não sendo necessário um ambiente isolado, e consegue gerar materiais praticamente idênticos à fornecida por injeção plástica.

Após a expiração da patente criada por Scott Crump gerou-se um movimento *open source* sobre impressoras 3D de baixo custo, que consiste na partilha de códigos que permitem que qualquer pessoa os adapte à sua impressora e faça alterações com vista à melhoria destes mesmos códigos.

No controlo de impressoras 3D utiliza-se o código G, que também é utilizado no controlo de máquinas CNC. Este código é criado através de programas que realizam o “fatiamento” da

peça a imprimir (por exemplo, Slic3r, Reptier Host, Cura, Simplify3D)., ou, em inglês, o *slicing* das peças. Os programas criam um código que define a trajetória do bico extrusor e/ou da base de impressão da impressora, define as diversas velocidades, entre outros parâmetros (Relvas 2018).

Um modelo tridimensional terá que ser desenvolvido previamente num *software* de CAD com a forma final da peça para ser realizada uma impressão 3D. Esse modelo é posteriormente convertido em ficheiro STL, ficheiro em formato poligonal, que descreve a forma exterior da peça. Subsequentemente, é criado um modelo em *SLi* que consiste na divisão da peça em partes por adição de material em camadas finas, sendo que a espessura destas camadas irá ditar a resolução do produto final. Através deste último modelo a impressora irá ser capaz de fazer a leitura e reproduzir o produto final (Volpato 2017). A Figura 2 mostra o esquema do processo envolvido desde a criação do modelo até à obtenção do produto final.

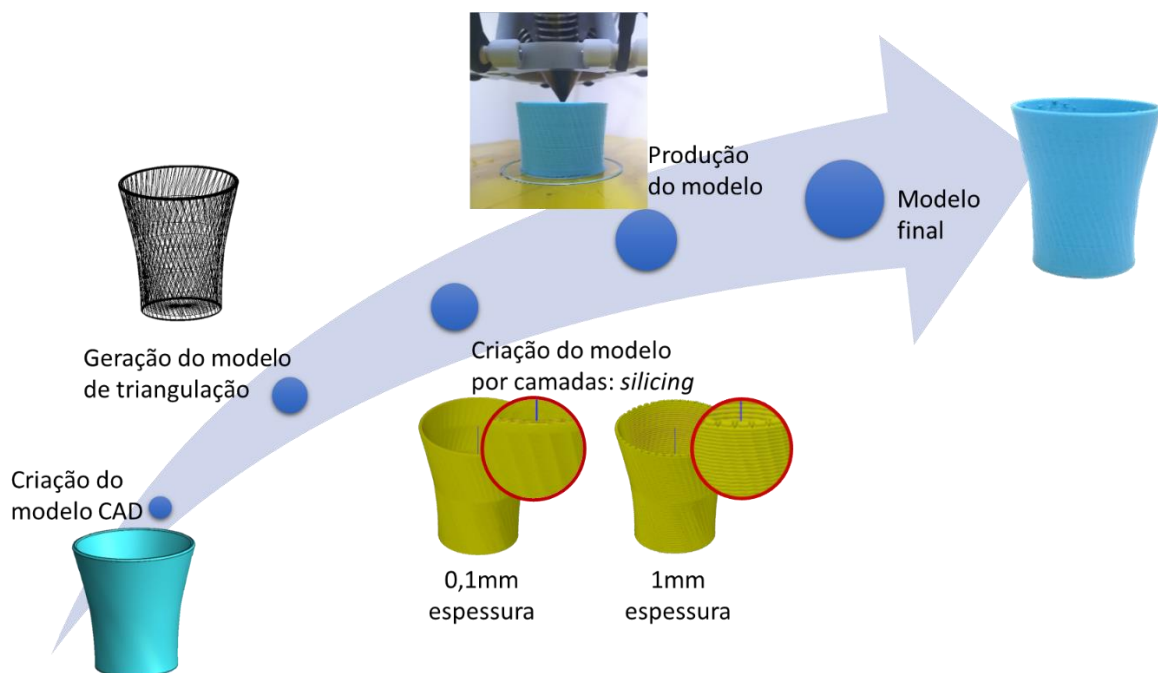


Figura 2 - Processo de formação de uma peça impressa por FDM.

No decorrer das dissertações anteriores utilizou-se o *firmware Marlin*, que é *open source*, disponível no site *Github*, de fonte aberta com o objetivo de melhoria rápida e contínua. Assim como o *Marlin*, existem muitos outros *firmware open-source* que podem ser utilizados, como é o caso do *Repetier*, *Smoothieware*, o *firmware* da *DUET*, entre outros.

### 2.3 Impressora tipo Delta

As impressoras tipo Delta assemelham-se a robôs de cinemática paralela, ou seja, uma cinemática de cadeias fechadas. Estes robôs têm duas plataformas: uma delas encontra-se fixa a uma estrutura enquanto que a outra é móvel e têm movimentos livres no espaço de trabalho. As três pernas paralelas do robô ligam o efector anexado à plataforma móvel, à plataforma fixa. Os manipuladores trabalham em simultâneo para efetuar um movimento na plataforma móvel (Staicu e Carp-Ciocardia 2003).

Existem essencialmente dois tipos de geometrias para impressoras FDM: as impressoras cartesianas e as Delta. Uma impressora cartesiana apresenta um volume de construção

retangular e movimenta o seu bloco de extrusão, essencialmente, de acordo com os eixos referênciais, na direção dos XX e dos ZZ, sendo que a base de impressão não se encontra estática e movimenta-se segundo o eixo dos YY. Uma impressora tipo Delta difere fundamentalmente de uma impressora cartesiana no que se refere ao volume de construção que é cilíndrico, na altura e na velocidade de impressão. A posição inicial do bico extrusor nesta máquina situa-se no centro da área de construção e no plano da base de impressão que é a origem dos eixos cartesianos (Bell 2015).

O movimento desta impressora funciona conforme a combinação do movimento dos três eixos onde o extrusor é suportado. Para realizar um movimento em X é necessário realizar o movimento dos três eixos em simultâneo (Bell 2015), assim, os carris movimentam-se de acordo com uma cinemática paralela, nos quais vários carris independentes atuam de forma paralela e simultânea sobre o efector.

O mecanismo de movimento é realizado pela articulação de dois braços paralelos ao efector em cada eixo, assim, os efetores estão conectados e têm de se mover em harmonia de forma a realizar um movimento controlado. O simples movimento segundo Z é realizado pelo movimento dos 3 carris em simultâneo, ou seja, o movimento realiza-se com base em algoritmos que calculam a trajetória de cada eixo segundo linhas imaginárias e segundo a hipotenusa (os braços) que é constante ao longo do processo. É assim definida a deslocação do efector.

Na Figura 3 está representado esquematicamente os principais componentes de uma impressora 3D tipo Delta. A superfície de impressão onde se inicia a construção das peças pode apresentar um sistema de aquecimento. As torres são rearranjadas perpendicularmente à base de impressão, de forma a fazerem um ângulo de 120° entre si e classificadas como X, Y e Z no sentido anti-horário. Os carris são anexados a cada torre de forma a poderem-se mover verticalmente. O efector faz a ligação dos três braços correspondentes e suporta o bloco de extrusão (*hot end*). A ligação entre o carril e o efector é realizada através de dois braços paralelos com o mesmo comprimento. O bloco de extrusão é responsável por aquecer o filamento acima da sua temperatura de transição vítrea para assim permitir a extrusão do filamento, com um determinado diâmetro, definido pelo bico extrusor (Bell 2015).

O motor de extrusão alimenta o filamento através do tubo de *Bowden* até ao bico extrusor. Este elemento não está representado na Figura 3, contudo, normalmente situa-se à parte da estrutura ou sobre a mesma.

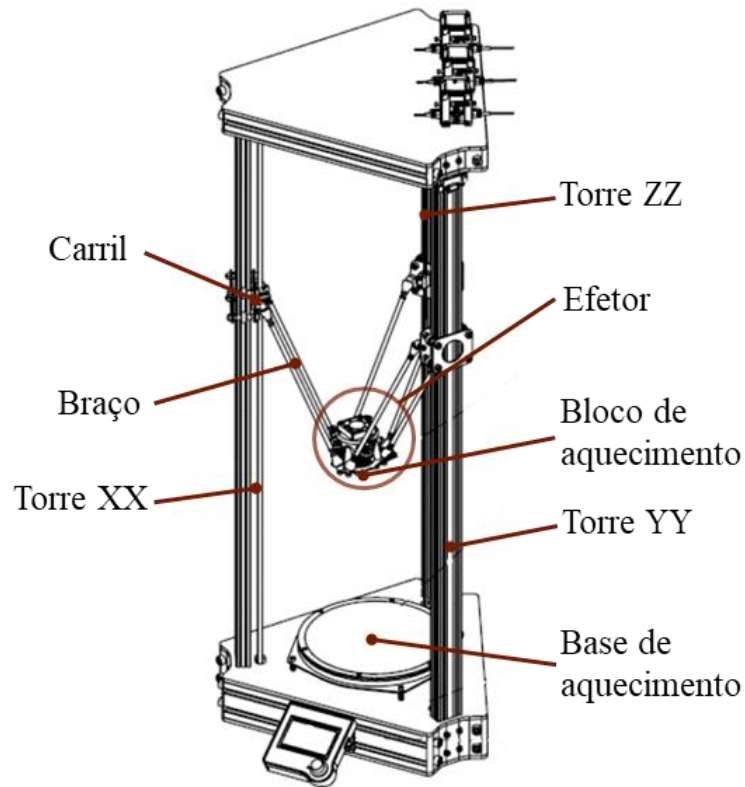


Figura 3 - Principais componentes de funcionamento de uma impressora tipo Delta.

*Parâmetros a considerar na calibração da geometria de uma impressora tipo Delta*

Para a calibração de uma impressora tipo Delta é necessário ter em atenção certos parâmetros que definem a sua geometria, pois é baseados neles que são interpolados os movimentos do efetor no espaço.

Na Tabela 1 estão enunciadas as principais dimensões, a introduzir no *firmware*, e que necessitam de ser mensuradas de uma forma exata e na Figura 4 estão esquematizadas as mesmas dimensões.

Tabela 1 - Parâmetros dimensionais de uma impressora tipo Delta (Bell 2015)

| #        | DEFINIÇÃO                   | DESCRIÇÃO   |
|----------|-----------------------------|---|
| <b>A</b> | Deslocamento plano da haste | Distância do centro do bico extrusor às torres.   |
| <b>B</b> | Haste Diagonal              | Comprimento dos braços da Delta entre rótulas (hipotenusa).   |
| <b>C</b> | Offset do Efetor            | Distância do centro da rótula da haste até ao centro do efetor.   |
| <b>D</b> | Raio                        | Distância calculada com base em $A - C - E$ .   |
| <b>E</b> | Offset do carril            | Distância entre o centro da rótula da haste até ao centro do carril.                                    |
| <b>F</b> | Curso máx. do carril        | Altura máxima que o carril percorre na torre.   |
| <b>G</b> | Altura de Referência        | Altura máxima que é possível imprimir uma peça, ou seja, altura máxima da coordenada z acima da origem. |
| <b>H</b> | Raio de Impressão           | Raio máximo em que é possível realizar uma impressão.   |

As impressoras tipo Delta são montadas de forma a que o tamanho dos braços, que fazem a ligação dos carris ao efetor, tenham a mesma dimensão relativamente às três torres. Uma vez que a hipotenusa não varia, é necessário o ajuste do parâmetro D para a calibração da impressora e para o correto posicionamento e movimento (convexo, côncavo ou plano) do bico extrusor.

É de elevada importância que se efetue bem as medições estruturais da impressora tipo Delta, pois é com base nesses dados que irão ser realizadas as interpolações executadas durante a leitura do código G.

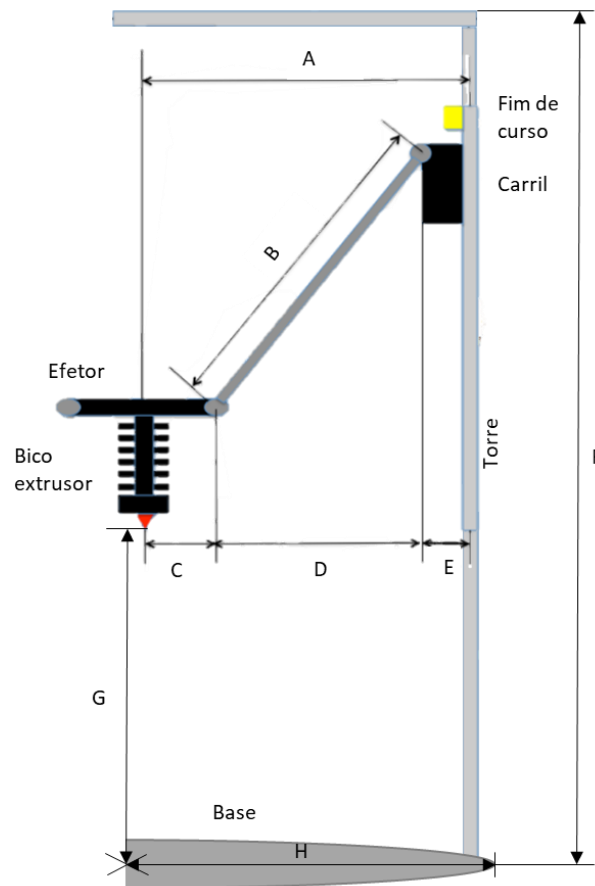


Figura 4 - Cinemática de uma impressora tipo Delta. Adaptado de Bell (2015).

## 2.4 Extrusor Diamond Hotend

No mercado da impressão 3D existem vários tipos de bicos extrusores com diferentes geometrias, tamanhos de saída do filamento e ainda de vários materiais. O *Diamond hotend* apresenta um bico de latão em formato de diamante que permite a impressão simultânea de 3 filamentos de diâmetro de 1.75 mm. No interior do bico extrusor existe uma pequena câmara onde os três materiais se misturam. Posteriormente são extrudidos num estado “amolecido” com um diâmetro de 0.4 mm (RepRap.org 2018).

O bico extrusor possui três zonas de aquecimento para materiais com temperaturas de transição vítrea semelhante, isto acontece uma vez que existe apenas uma resistência de aquecimento para os três filamentos o que implica só poder trabalhar com um material de cada vez (por exemplo, PLA, PETG, ASA e ABS).



Este componente é de especial interesse, pois no caso de serem utilizados três filamentos em simultâneo não necessita de ter várias resistências de aquecimento, no entanto a resistência lá inserida terá de debitar uma maior energia para o aquecimento dos três filamentos. O *Diamond Hotend*, exposto na Figura 5, apresenta a característica de realizar a transição rápida de cores provocando menor desperdício de material comparativamente às impressoras multimateriais.

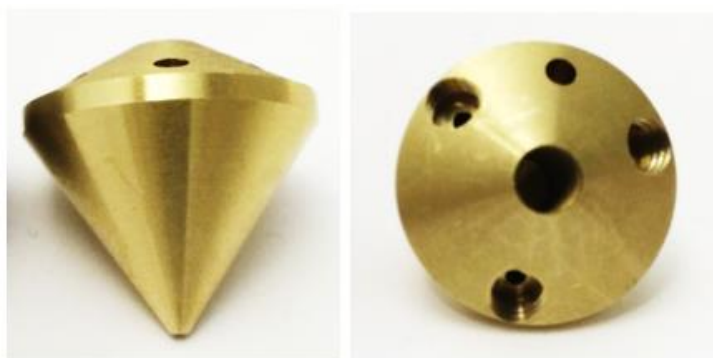


Figura 5 - *Diamond Hotend*.

O *Diamond Hotend* tem a capacidade única de extrudir filamentos de três cores em simultâneo sem haver necessidade da existência de outro bico. Os filamentos entram na câmara de mistura, são aquecidos e posteriormente extrudidos. Mediante esta característica, este extrusor tem a capacidade de misturar os filamentos e extrudir uma nova cor. Com a combinação de diferentes percentagens dos filamentos inseridos, é possível imprimir parte do espectro de cores (Beaudoin, Boulanger, e DiPersio 2017).

A partir das cores primárias ciano, amarelo e magenta, é possível criar um espectro de dezasseis cores como se mostra na Figura 6. Este espectro é conseguido através de diferentes rácios atribuídos aos três filamentos inseridos.



Figura 6 - Espectro criado com a combinação das três cores primárias (RepRap.org 2018).

No entanto, com este tipo de bico extrusor é necessário utilizar torres de purga, para que, desta forma seja efetuada a deposição do material anterior e seja iniciada a extrusão do novo material. Caso não exista esta torre de purga, o material depositado irá conter uma mistura de materiais conferindo uma cor de transição, que provoca uma aparência indesejada ou, então, afeta a impressão ou a qualidade do material extrudido (Beaudoin, Boulanger, e DiPersio 2017). Este defeito pode ser observado na Figura 7 em que, na fase cor de rosa, é possível observar deposição de filamentro preto.



Figura 7 - Peça realizada sem torre de purga.

Existem outras formas de imprimir com várias cores, como é o caso das impressoras com dois bicos extrusores ou então com auxílio de outros componentes exteriores à impressora como é o caso do sistema Palette+ referido por Brandão (2018). O Palette+ é um equipamento, recentemente adquirido pelo Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviço (LDPS), com objetivo de impressão multicolor de forma mais eficaz que pode utilizar até quatro filamentos de diferentes tipos de materiais. Este equipamento faz a alimentação do filamento para o seu interior, cortando e ligando os filamentos de diferentes tipos, de forma programada, de acordo com a peça a realizar e movimenta o filamento através de um tubo de *Bowden* até ao bloco de extrusão. Contudo, o Palette+ tem a necessidade de produzir torres de purga de grandes dimensões para conseguir dar a descarga do material anterior, causando grandes gastos de material, como é possível verificar na peça realizada, Figura 8.

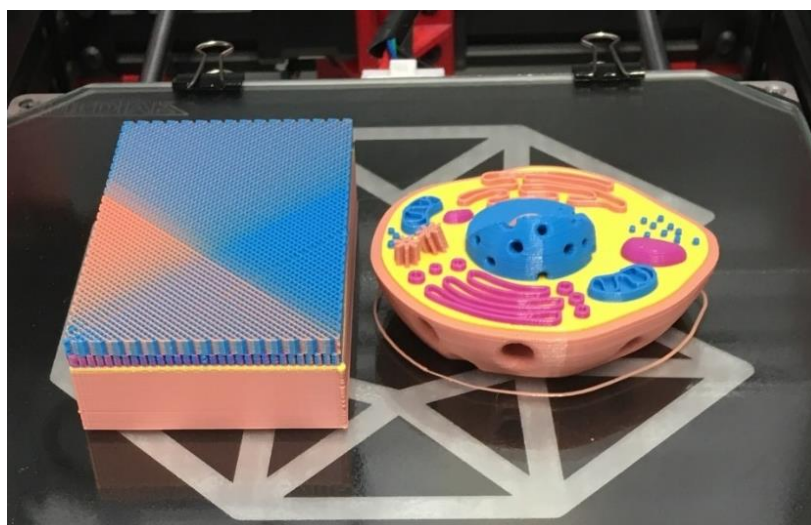


Figura 8 – Peça e torre de purga realizada pelo Palette+ do LDPS.

## 2.5 Materiais

Existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados na tecnologia FDM, no entanto, o PLA, o PETG e o ABS são os polímeros básicos mais utilizados e conhecidos como os materiais de uso diário. Para além destes, existem outros termoplásticos básicos que conferem diferentes propriedades, como é o caso dos flexíveis, TPE, TPU, TPC, do nylon e do policarbonato (PC). Outro tipo de filamentos, conhecidos como exóticos ou recreativos conjugam o PLA ou o ABS com outro tipo de materiais tais como a madeira, os metais, os materiais magnéticos, os materiais condutores elétricos, os de brilho no escuro, os de mudança de cor, os biodegradáveis e os cerâmicos. Por último, existem os filamentos considerados “profissionais” como por exemplo os que contêm fibras de carbono, PC/ABS, HIPS, PVA, ASA, PP, acetal, PMMA, FPE, acrílico, filamentos de limpeza do extrusor, etc. (Rohringer 2019).

O PLA é um termoplástico preparado a partir de amido de milho e material vegetal, conferindo-lhe assim características bio-degradáveis e ecológicas. Este polímero é bastante rígido e difícil de deformar. No entanto, devido à temperatura de transição vítrea de aproximadamente 60°C, este material pode deformar-se ao sol. Outras características como alta fluidez durante a extrusão e baixa contração são propriedades essenciais em FDM. A temperatura de fusão é de 160°C, sendo que a temperatura ideal de extrusão está compreendida entre 180°C e 230°C, dependendo das especificações técnicas do fornecedor. O aquecimento da base de impressão para o PLA é prescindível, contudo, utilizam-se temperaturas entre 20°C até à temperatura de transição vítrea (Relvas 2018).

O material que irá ser utilizado na presente dissertação é o PLA, pois é dos três materiais mais utilizados, PLA, ABS e PETG, o que confere maior precisão em detalhes, o mais acessível, o de maior dureza, de menor contração e o que apresenta maior qualidade superficial.

### *Estudo dos parâmetros de impressão do PLA*

A cada material de impressão estão associados parâmetros que podem influenciar o acabamento superficial, as propriedades mecânicas, entre outras características. Como referido anteriormente tem temperaturas ideais de extrusão que variam desde 180°C a 230°C. A temperatura da base de impressão também poderá influenciar a adesão do material, e por isso, é normalmente definida de acordo com a temperatura de transição vítrea que geralmente ronda os 60°C.

De acordo com Wittbrodt e Pearce (2015), verifica-se que a temperatura de impressão pode influenciar características do produto impresso, tais como por exemplo o aumento da cristalinidade do material, onde se obtém o maior grau a 210°C, e ainda a resistência à tração, aumentando também a sua tenacidade. Em termos microscópicos é possível analisar a melhor adesão entre camadas quando se aumenta a temperatura.

A humidade a que o filamento fica sujeito aquando o seu armazenamento também é um fator que influencia o comportamento mecânico das peças produzidas. Em atmosferas secas, as peças produzidas tornam-se mais resistentes, mas menos tenazes, no entanto as mesmas peças produzidas com filamentos armazenados em ambientes húmidos têm um comportamento mais frágil. Além disso, para maiores temperaturas de extrusão o material torna-se mais fluído, e por consequência, obtém-se melhores propriedades mecânicas (até ao máximo de 220°C) (Ana Pilar Valerga, Moisés Batista, e Girot 2018).

Segundo Ana Pilar Valerga, Moisés Batista, e Girot (2018), o estudo das condições de armazenamento é o fator mais importante e o que mais influencia as propriedades mecânicas das peças finais obtidas quando se trata de PLA. Através da Figura 9 verifica-se que para altos níveis de humidade o material depositado se torna inconsistente e composto por vazios.

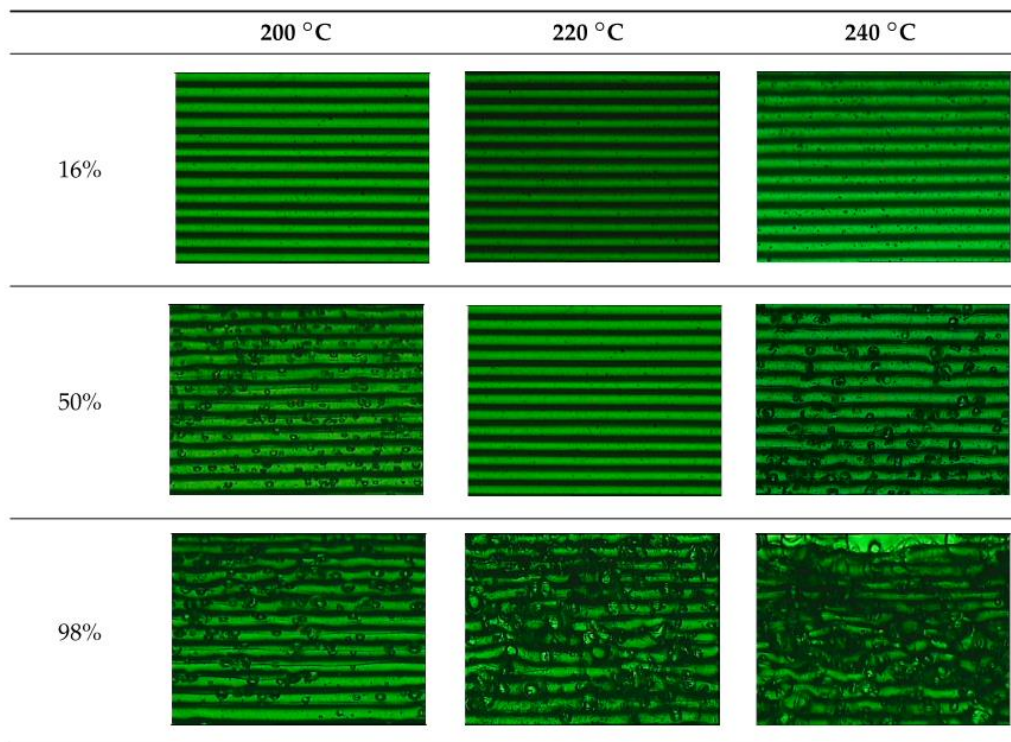


Figura 9 - Influência das condições de armazenamento e temperatura de operação no acabamento superficial (Ana Pilar Valerga, Moisés Batista, e Girot 2018).

Numa comparação entre um filamento de cor preta e outro transparente, verificou-se numa análise de *differential scanning calorimeter* (DSC), que os materiais apresentam temperaturas de transição vítrea e temperaturas de fusão ligeiramente diferentes. A análise mostra também que o histórico de ciclos de aquecimento e arrefecimento altera as curvas DSC de cada material (Roberto Spina 2018).

Santana et al. (2018) realizou um estudo comparativo do PLA com o PETG no qual verificou que o PLA impresso na condição de impressão unidirecional (0°), com estratégia de deposição concêntrica e orientação de construção lateral, apresentou uma tensão de cedência mais próxima relativamente a uma peça de PLA injetada. De acordo com a comparação realizada verificou-se ainda uma grande rigidez do PLA, contudo, o PETG consegue ter maior resistência a degradação térmica e apresenta um comportamento mais flexível.

#### *Estudo do efeito da cor no PLA*

A bastante procura deste material para impressão 3D levou ao aparecimento de produtores de filamentos assim como a introdução de pigmentação no mercado. Assim sendo, a composição química, a temperatura de extrusão do filamento e as condições de armazenamento de cada material vai depender de fabricante para fabricante, como é o caso do material em estudo. Devido à inexistência de informações sobre todas as propriedades térmicas, de escoamento e de comportamento do filamento utilizado, houve a necessidade do estudo de vários artigos que correlacionam as cores com diferentes propriedades.

Wittbrodt e Pearce (2015) estudaram o efeito da temperatura de extrusão de cinco cores (branco, preto, azul, cinza e natural) nas propriedades mecânicas do PLA. Neste estudo foram realizados testes de cristalinidade XRD (*X-ray diffraction*), de tração e de microestrutura. Os resultados apresentam uma grande relação da resistência à tração com a cristalinidade, e ainda uma forte relação entre a cristalinidade e a temperatura de extrusão. A percentagem de cristalinidade das peças impressas em 3D dependem claramente da cor pois de acordo com os resultados do XRD, demonstrado na Figura 10, para cada cor correspondem diferentes picos de cristalinidade. Noutro teste de XRD, foi verificado que a cristalinidade de um material também pode variar de acordo com a temperatura, sendo que o maior pico ocorre a 210°C. Todas as amostras apresentam praticamente o mesmo módulo de elasticidade de 2,78GPa ( $\pm 0,35$ ), no entanto, a resistência à tração é diferente para materiais de cores diferentes. Conclui-se desta forma, que a adição de pigmentação pode baixar a resistência à tração e induz a alteração na percentagem de cristalinidade do material. A cor branca é a que tem maior percentagem de cristalinidade à temperatura de 210°C (Wittbrodt e Pearce 2015).

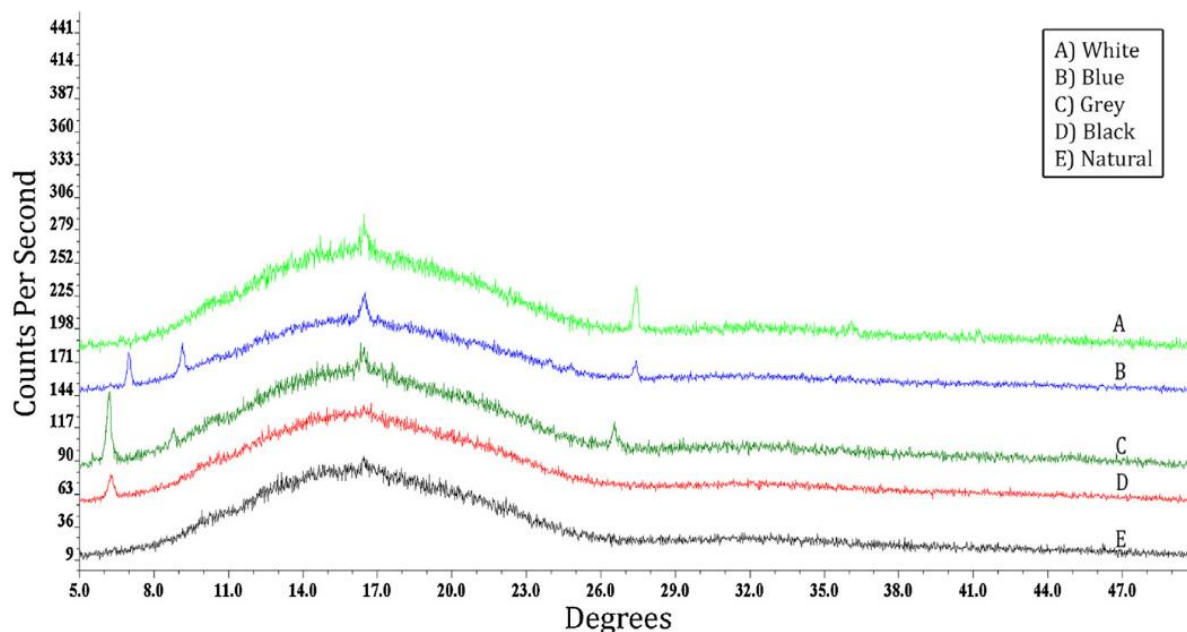


Figura 10 - Resultados de XRD compostas para diferentes cores de PLA por ordem decrescente de cristalinidade, com as percentagens mais altas na parte superior. Cores: (A) branco, (B) azul, (C) cinza, (D) preto e (E) natural (Wittbrodt e Pearce 2015).

Outro estudo realizado por Ana Pilar Valerga, Moisés Batista, e Girot (2018), com quatro cores (rosa, cinza, transparente e verde) conclui que materiais sem pigmentação conseguem apresentar valores dimensionais mais próximos dos valores nominais. Verificou-se que a falta de pigmentação também se traduz numa viscosidade maior que resulta num melhor acabamento superficial. Para todas as cores é possível verificar que a 200°C, todos os materiais apresentam um erro dimensional semelhante. Na presença de humidade, a cor verde é a que saiu mais prejudicada, apresentando uma menor tenacidade. A ausência de pigmentação tornou o PLA mais tenaz e maleável.



Cicala et al. (2018) e Soares et al. (2018) fizeram uma análise entre o PLA de cor branca, preta e verde. Verificou-se, que os filamentos de cor preta e branca tinham melhor desempenho, enquanto que o filamento de cor verde falhava na qualidade de impressão. Para além disto, a análise *differential thermal analysis* (DTA) da amostra verde mostrou que houve uma diminuição drástica na temperatura de fusão, bem como o aumento da temperatura de transição vítrea em relação à amostra preta e branca. Concluíram também que para diferentes cores de filamento são requeridos diferentes parâmetros de impressão FDM, tais como a temperatura de extrusão, com o objetivo de melhorar a qualidade de acabamento (Cicala et al. 2018).

Leonardo Santana et al. (2016) estudaram dois filamentos naturais (transparente e branco) e dois coloridos (cinza e amarelo). Os ensaios de espectroscopia no infravermelho por transformada de *Fourier* (FTIR) mostraram diferentes composições moleculares que também influenciam na temperatura de extrusão dos mesmos como verificado nos ensaios de calorimetria dos materiais.

Por fim, Brandão (2018) realizou vários ensaios com o mesmo material utilizado nesta dissertação. Os testes de flexão realizados não variam de acordo com a disposição das cores nas amostras apresentando valores de acordo com os estudos realizados para o PLA. Quanto ao estudo da combinação de cores, verificou-se que a temperatura tem especial relevância para a adesão entre camadas de diferentes cores e nos valores de resistência mecânica (A. Brandão, Jorge Lino Alves, e Villa 2018).

## 2.6 Softwares de CAM e de controlo

Como explicado no Capítulo 2.2, uma peça antes de ser impressa necessita de ser convertida num ficheiro *Computer Aided Manufacturing* (CAM) no qual a impressora consegue interpretar.

Uma vez que existe no mercado uma grande variedade de *softwares* CAM, dos quais alguns são livres e outros são pagos. Alguns têm o seu próprio algoritmo de construção de camadas como é o caso do *Simplify3D*, do *Slic3r* e do *Cura*, no entanto, programas como o *Repetier-Host* utilizam o *Slic3r* para o algoritmo de geração de camadas. Antes de começar a trabalhar com cada um destes programas é necessário editar as configurações necessárias de acordo com a impressora a utilizar. O *firmware* da impressora, o tamanho e a geometria da base de impressão, o diâmetro do bico extrusor, o diâmetro do filamento, a temperatura de extrusão e a temperatura da base de impressão são parâmetros que variam de acordo com a impressora e com o tipo de filamento utilizado.

O *Slic3r* está dividido em várias partes. A primeira parte (1) é a que representa a configuração dos parâmetros de impressão, do filamento e do tipo de impressora, bem como, pequenas alterações da peça a imprimir (escalas, cortes, rotações...). Na segunda parte (2) é possível verificar uma pré-visualização esquemática da peça na área de impressão, juntamente com a área de informação sobre a peça lá adicionada. Quando a peça tiver as configurações definidas, efetua-se a divisão em camadas e a exportação do código G que se encontra na terceira parte (3). Na Figura 11 é possível visualizar uma janela do programa *Slic3r*, divididas pelas três partes enunciadas (González 2016).

O *Pronterface* é uma interface de controlo da impressora, a partir do qual é possível configurar e enviar códigos para a impressora. Neste *software* consegue-se também movimentar e controlar o funcionamento das ventoinhas de forma fácil e rápida.

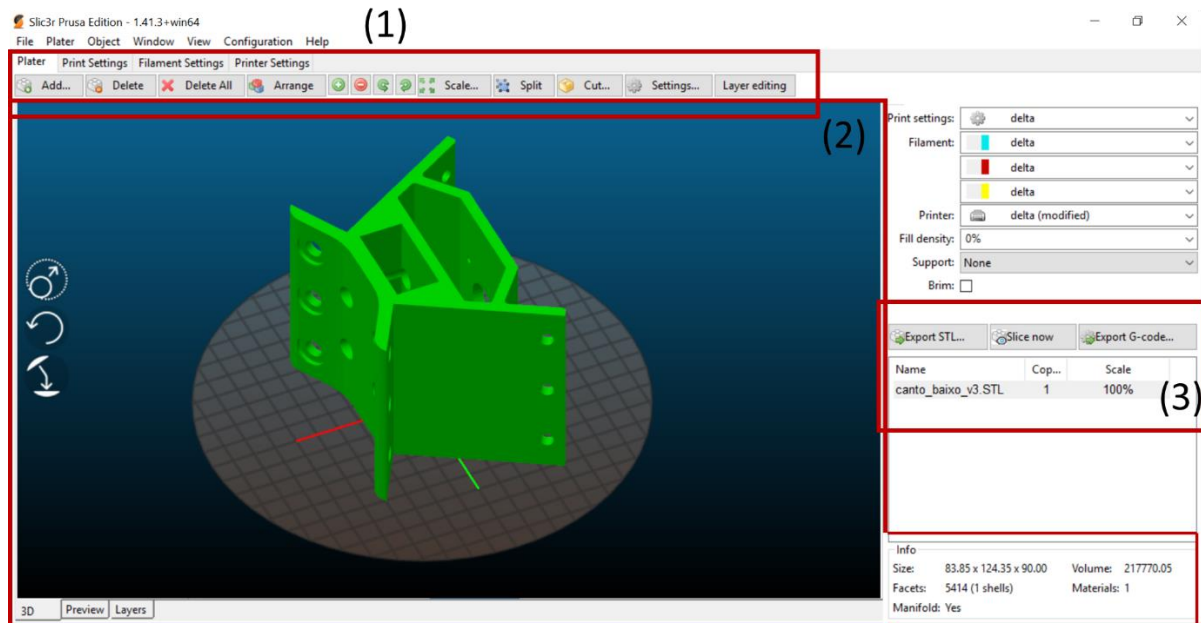


Figura 11 - Demonstração da janela tipo do Programa Slic3r.

*Repetier-Host* é um programa de fatiamento conhecido entre os internautas do sistema *open-source* - RepRap - por ser um programa muito intuitivo. Este programa consegue manipular as propriedades da impressora e de impressão. Através do *Slic3r* é possível configurar o fatiamento. Por meio do separador “*G-Code Editor*” consegue-se visualizar e fazer a edição e sobreposição do código realizado com o programa *Slic3r*. Este programa pode controlar parâmetros durante a impressão, e também ser utilizado como interface de movimentação e controlo (González 2016). O *Repetier-Host* é um programa bastante difundido quando se discute impressão multicolor.

O *Cura* e o *Simplify3D* são outros programas que permitem preparar a peça a imprimir e também alterar os parâmetros de impressão para cada objeto, podendo desta forma imprimir objetos com diferentes qualidades numa só impressão.

As peças a adicionar nestes programas necessitam de estar em ficheiros realizados através de programas CAD ou então descarregados através de sites, como é exemplo do *Thingiverse*, do *GrabCAD*, do *YouMagine* entre outros que são de descarga gratuita.

Outros programas, como o *Meshmixer*, conseguem manipular as malhas de triângulos de forma a otimizar a geometria da peça. Por intermédio deste programa é possível importar ficheiros STL para fazer as alterações necessárias como melhorar a malha, separar as peças por partes, deformar, esculpir, e ainda, acrescentar geometrias presentes na biblioteca do programa ou outras geometrias importadas. Outra funcionalidade importante é a análise da malha onde é possível verificar os pontos onde irá ser necessário a colocação de suportes ou outros pontos críticos (González 2016).

## 2.7 Placa de controlo

As placas de controlo são conhecidas como *motherboards* (placa mãe ou placa principal), são o cérebro de todo o tipo de máquinas. Este componente é responsável pela leitura do código G e a tradução em sinais capazes de controlar os motores de passo. É neste componente que se efectua o carregamento do *firmware* que contém a informação necessária para a impressora funcionar corretamente. As *motherboards* têm na sua base principal de funcionamento o microcontrolador.

O microcontrolador da placa é o componente mais importante. É nele que se efectuam os cálculos, realiza-se a leitura dos sensores e controla-se os *steppers drivers* dos motores de passo, controla-se a velocidade das ventoinhas, o aquecimento do bico extrusor e o aquecimento da base de impressão. Este microcontrolador também é capaz de fornecer dados à interface do sistema, quer através de um ecrã de controlo que está normalmente associado à impressora ou, via USB, através de um computador.

Cada motor de passo necessita de uma placa chamada *stepper driver* (circuito integrado responsável pelo controlo da movimentação do motor), que podem estar integrados na placa principal, ou então, numa placa de extensão. Estes motores utilizam um método de controlo chamado *microstepping*. O *microstepping* vai ditar a resolução dos movimentos do motor e ainda vai “suavizar” a movimentação do mesmo, ou seja, a dita sensibilidade da operacionalidade do motor (Smoothieware.org 2019).

As placas de controlo de impressão 3D necessitam de transistores designados em inglês por *mosfets*. Estes elementos são importantes para controlo de elementos de aquecimento como é exemplo dos bicos extrusores, das bases de impressão, de ventoinhas e outros acessórios alimentados de maior potência (Smoothieware.org 2019).

Existem vários tipos de controladores utilizados em impressão 3D que se diferenciam pelo tipo de microcontrolador, pela capacidade de processamento, pelo tipo de *drivers* utilizados, pelo número de pinos para ligação de componentes eletrónicos como por exemplo os motores, pelos *mosfets*, pelos indicadores de sinal, pelo tipo de fonte de alimentação que necessita (12/24V), etc.

O controlador mais comum utilizado em impressoras 3D é o *Arduino Mega*, controlado através do *software Arduino IDE* que é disponibilizado pela companhia. A *motherboard* mais utilizada para este tipo de controlador é a *RAMPS* ou a *RAMBo*. No caso de impressoras de geometria Delta, a mais comum é a *RAMPS (RepRap Arduino Mega Polulu Shield)*.

Hoje-em-dia já é possível encontrar uma grande variedade de controladores adaptados para a impressão 3D e ainda mais especializados para cada tipo de layout das impressoras. Estes podem variar em um grande número de propriedades, no preço de compra e na complexidade, oferecendo assim ao consumidor a possibilidade de escolher a melhor opção de acordo com o objetivo final que se requer.



## 2.8 Parâmetros de impressão

Existe uma panóplia de propriedades que podem variar de impressora para impressora, como é exemplo, a sua geometria, o bico extrusor, o comprimento dos tubos de *Bowden*, os motores extrusores, a capacidade de processamento da placa de controlo, o filamento utilizado, entre outros. Dado a grande possibilidade de variação das propriedades é necessário conseguir adquirir um conjunto de parâmetros de impressão de forma a otimizar o resultado obtido por FDM.

Os parâmetros de impressão são definidos através de um *software* de CAM ou então diretamente pelo *firmware* da impressora. De entre o grande conjunto de parâmetros, interessa salientar aqueles que têm mais influência no objeto final.

A altura de camada controla a dimensão vertical do filamento depositado, e assim o número total de “fatias”/camadas que a peça irá ter. Quanto mais finas forem as camadas maior será a precisão, no entanto, a quantidade de camadas será superior, o que implica um aumento do tempo de impressão. Este parâmetro situa-se normalmente entre o intervalo de 0.1 mm a 0.4 mm sendo que 0.2 e 0.3 mm são as alturas mais utilizadas, conforme a sua aplicabilidade. Para uma boa precisão dimensional devem ser utilizadas menores alturas de camadas ao passo que para uma altura de camada maior aplicada obtém-se uma peça com maior rigidez (Alafaghani e Qattawi 2018).

A densidade de preenchimento no interior da peça varia numa gama de 0% a 100%. Este preenchimento pode apresentar diversos modelos geométricos que variam com diferentes orientações. De acordo com Alafaghani e Qattawi (2018), a melhor precisão dimensional obtém-se com um preenchimento de 20% num modelo hexagonal, no entanto para se obterem boas propriedades mecânicas é necessário um preenchimento de 100% com um modelo geométrico triangular.

A velocidade de impressão pode ser definida numa gama de valores limitada superiormente pelo *hardware*, sendo que a velocidade média utilizada correntemente situa-se entre 40 e 60 mm/s. A definição desta velocidade afetará a qualidade final da peça, ou seja, a precisão do posicionamento do efector. Para impressões com maior velocidade é essencial um aumento da temperatura de extrusão como se pode verificar através da Figura 12 (González 2016). De acordo com Bell (2015), a velocidade pré-definida para impressoras Delta é de 60 mm/s.

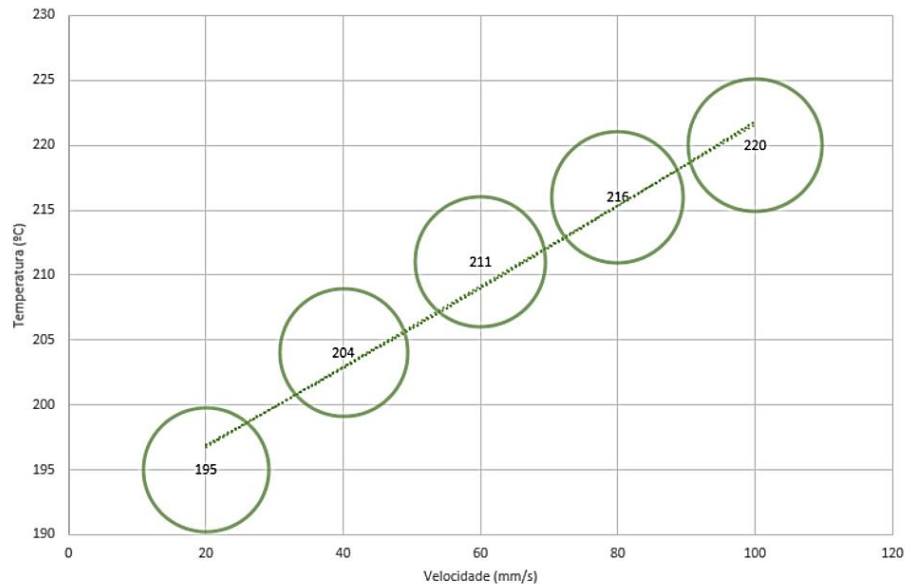


Figura 12 - Definição da temperatura do PLA de acordo com a velocidade de impressão (Filament2Print 2018).

A temperatura de extrusão é um dos parâmetros que mais influencia nas propriedades mecânicas do material. Como referido anteriormente, a temperatura de extrusão do PLA fica entre 180°C a 230°C, sendo que, segundo Wittbrodt e Pearce (2015) e Alafaghani e Qattawi (2018) obtém-se materiais com melhores propriedades mecânicas a 210°C. No entanto para se obter melhor qualidade superficial do objeto é necessário uma temperatura de extrusão mais baixa, cerca de 190°C (Alafaghani e Qattawi 2018).

O multiplicador de extrusão é um parâmetro que permite alterar a proporcionalidade do fluxo de filamento extrudido. Este fator que normalmente varia entre 0,9 e 1,1 pode ser avaliado através da largura do material extrudido. Por conseguinte, é necessário fazer uma avaliação do material extrudido para se alcançar o valor correto para este parâmetro, sendo que varia essencialmente com base no filamento utilizado.

A retração é o atributo dado quando o filamento é retraído durante uma fase em que se pretende interromper a extrusão do filamento. Esta ação é necessária para aliviar a tensão do filamento fundido, que se encontra no bico extrusor, evitando assim a saída do filamento para a peça. É importante referir que este fator é muito importante quando se trata de impressoras multicolor de um só bico extrusor, visto que é desejável haver uma troca rápida de cores sem que elas se misturem. A retração é delineada principalmente pela distância e pela velocidade de retração que variam de acordo com o tipo de filamento e com características da máquina.

Complementando, existem outros parâmetros que alteram a qualidade de impressão, mas que têm menor relevância para as propriedades mecânicas e para o acabamento superficial da peça. Porém, seria necessário realizar um estudo sobre a influência de todos os parâmetros para se atingir uma impressão rigorosa.

## 2.9 Impressora Delta do LDPS

No âmbito da presente dissertação, foi atribuída uma máquina tipo Delta presente no LDPS. Como referido no capítulo anterior, a impressora foi desenvolvida por Abreu (2017), otimizada por Regadas (2017) e, seguidamente, foram realizados alguns resultados experimentais e caracterização do material pelo Brandão (2018).

### 2.9.1 Apresentação cronológica do desenvolvimento da impressora

O principal objetivo do desenvolvimento de uma impressora deste tipo foi conceber ao Laboratório de Desenvolvimentos de Produto e Serviços (LDPS) uma máquina que imprima peças em altura e multicolores. Para além destas propriedades, houve a necessidade de ultrapassar certas limitações de uma impressora cartesiana. Assim sendo, as impressoras Delta distinguem-se das restantes presentes no laboratório pelas altas velocidades de funcionamento, pela sua precisão de posicionamento e ainda pelo volume de impressão.

Na dissertação realizada por Abreu (2017) estão descritos os vários procedimentos de escolha para a realização da máquina, esquematizada na Figura 13. Esta impressora funciona com a movimentação do efetor em três eixos sendo que a base de impressão fica estática.

O bico extrusor escolhido, *diamond hotend extruder*, tem como principal característica a introdução de três filamentos distintos podendo ainda efetuar a mistura destes. Esta característica torna esta Delta diferente das impressoras Delta comuns.

A equipa envolvida nesse trabalho elaborou um artigo para a Revista Tecnometal, focando o conceito de impressão 3D, a cinemática de uma impressora tipo Delta e, ainda, o projecto de construção da impressora. Este artigo foi distinguido com um prémio Inovação & Design no 40º Aniversário da Tecnometal- “A Revolução Digital e a Transformação Empresarial”, na AIMMAP (22 de Março de 2019) (João Abreu, Santiago Castellanos, e Alves 2017).

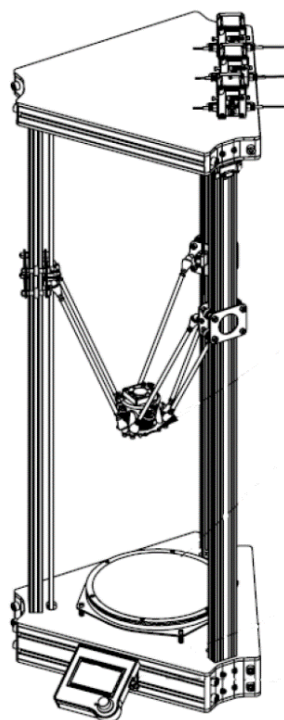


Figura 13 - Máquina Delta desenvolvida inicialmente (Abreu 2017).

No seguimento da dissertação anteriormente referida, Regadas (2017) realizou uma reestruturação da impressora do ponto de vista funcional e ainda da programação do *firmware*, para desta forma, realizar a impressão com três cores diferentes. Foi implementada uma nova reorganização do *hardware* para ordenar os componentes e facilitar as ligações entre as placas. Posto isto, foi possível reconfigurar o *firmware* utilizado de acordo com as especificações desta impressora.

Na Figura 14, são mostradas algumas das alterações efectuadas no *hardware* da impressora. Estas alterações encontram-se detalhadas na dissertação referida.

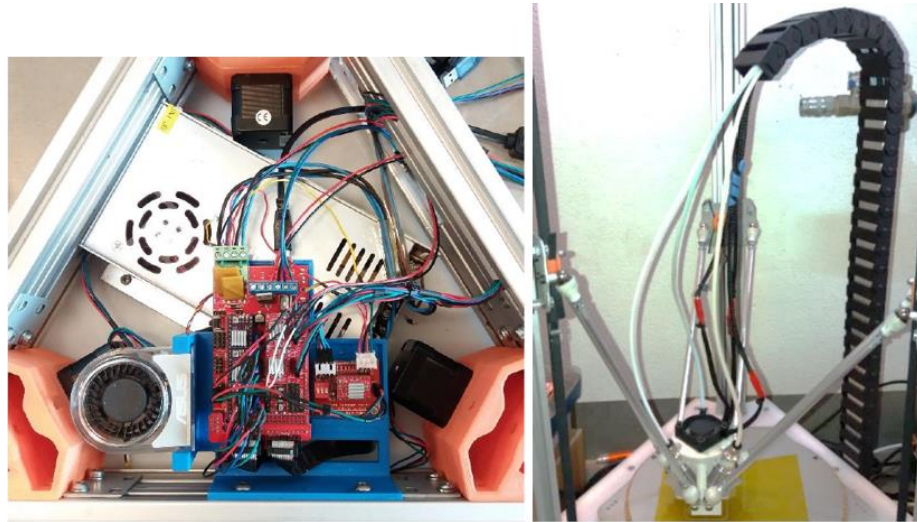


Figura 14 - Alterações efectuadas e otimização da impressora (Regadas 2017).

Por último, a terceira dissertação, efectuada por Brandão (2018) resultou na calibração de todas as configurações da máquina e na aplicação de sistemas de melhoria na extrusão. Realizaram-se ainda provetes que foram testados mecanicamente, onde foi possível verificar o comportamento mecânico da impressão de amostras com três cores em simultâneo. As conclusões retiradas estão detalhadamente esclarecidas na dissertação referida. A Figura 15 mostra os ensaios de flexão efectuados com provetes de três cores diferentes e, ainda uma imagem microscópica da deposição de camada entre cores de uma amostra.

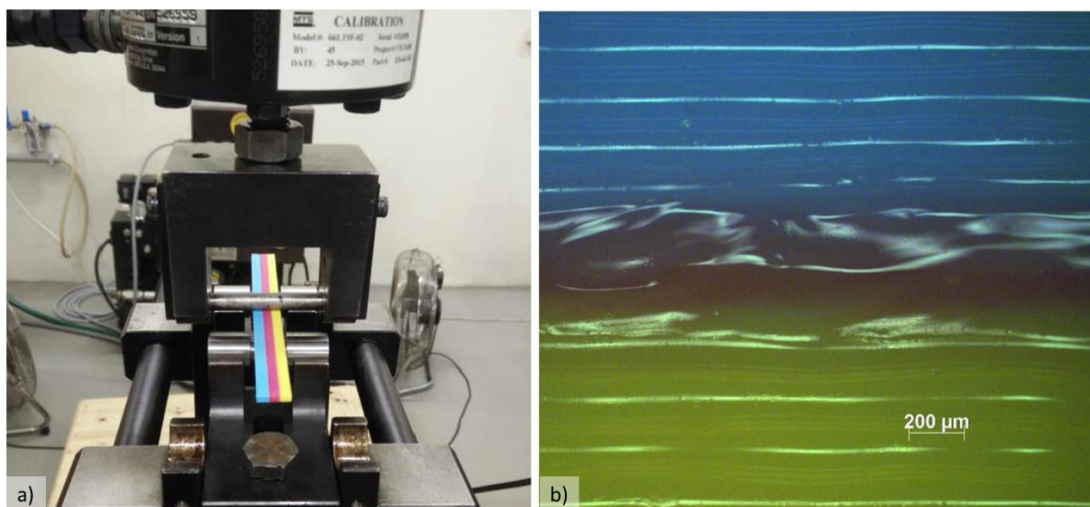


Figura 15 – a) Ensaio de flexão b) Imagem microscópica de uma amostra (Brandão 2018).

Para além das alterações citadas acima, foram também realizadas modificações após as dissertações realizadas. A ligação dos braços de suporte ao efector apresentavam rótulas magnéticas com elevado desgaste causado pela elevada massa dos componentes de extrusão, desacoplando-se facilmente durante períodos de impressão alargados, por isso, houve a necessidade de as trocar por rótulas esféricas Igubal®. Projetou-se outra estrutura do efector para se conseguir instalar os novos braços com as novas rótulas. Alterou-se também, a ventoinha utilizada no arrefecimento do bico extrusor, pois a anterior provocava um elevado ruído sonoro.

A Figura 16 mostra a nova estrutura com as alterações efetuadas, e consideravelmente mais rígida.

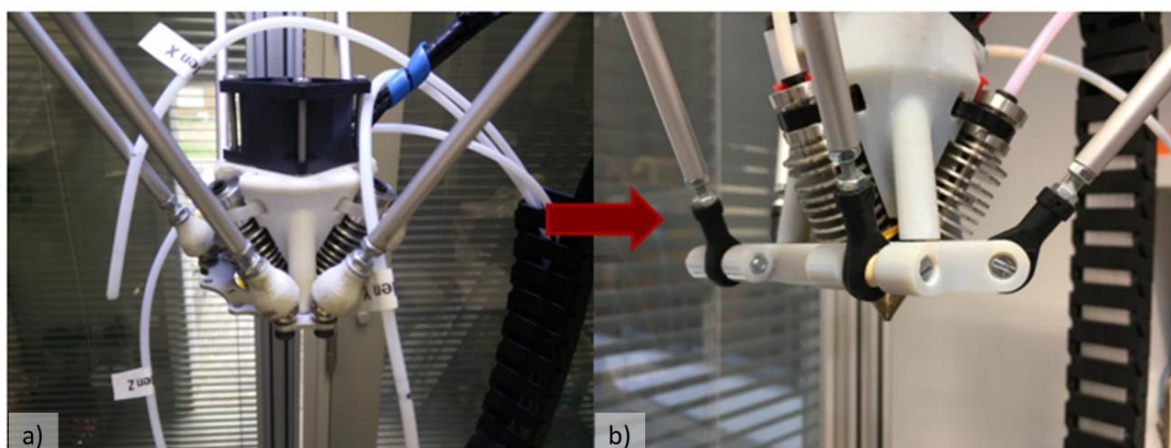


Figura 16 - Estrutura do efector a) Antes das alterações b) Após alterações.

### 2.9.2 Estado atual da impressora

A impressora que estava disponível para esta dissertação representada na Figura 17, sendo capaz de imprimir objetos com uma altura de aproximadamente 600 mm e um diâmetro de 200 mm. Apresentava um bico extrusor de três filamentos, *Diamond Extruder*, braços de rótulas esféricas, e um sistema de transmissão por correia. A Tabela 2 especifica as características geométricas do equipamento.

Utiliza, como controlador, um *Arduino Mega 2560* com uma placa de expansão *RAMPS 1.4*. Os motores são os NEMA 17, sendo que os *stepper drivers* que comandam os motores de extrusão são os *DVR8825* e os que comandam a movimentação são os *A4988*. Utiliza uma base de impressão redonda de 220 mm de diâmetro (*PCB Heatbed MK3ALU*), e os sensores de temperatura são termístores do tipo NTC 100 k $\Omega$ .



Tabela 2 - Características geométricas da impressora

| #        | DEFINIÇÃO                   | DISTÂNCIA |
|----------|-----------------------------|-----------|
| <b>A</b> | Deslocamento plano da haste | 188.00 mm |
| <b>B</b> | Haste Diagonal              | 260.00 mm |
| <b>C</b> | Offset do Efetor            | 36.00 mm  |
| <b>D</b> | Raio                        | 120.00 mm |
| <b>E</b> | Offset do carril            | 32.00 mm  |
| <b>F</b> | Curso máx. do carril        | 900.00 mm |
| <b>G</b> | Altura de Referência        | 610.30 mm |
| <b>H</b> | Raio de Impressão           | 100.00 mm |

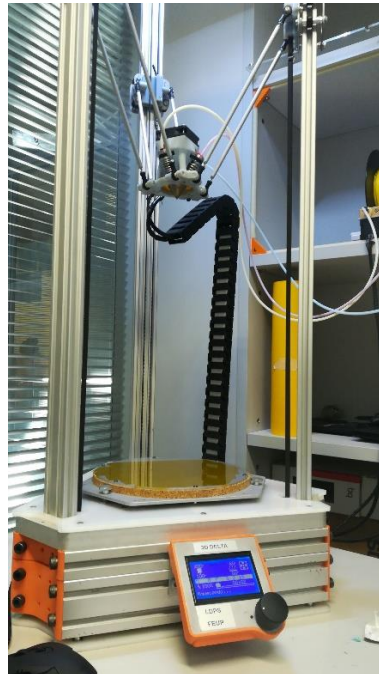


Figura 17 - Impressora FDM do tipo Delta do LDPS.

O *firmware* utilizado é o mais comum entre o mundo da impressão 3D, *Marlin 1.1.0-RC7*, ainda que a versão se encontre um pouco desatualizada. Como *software* de interface, utiliza-se sobretudo o *Repetier-Host v1.6.2* e o *Pronterface*.

Os filamentos encontravam-se isolados através de uma placa de acrílico para redução da humidade absorvida pelos filamentos, com aberturas para o filamento e para os fios elétricos dos motores, como é possível observar pela Figura 18.

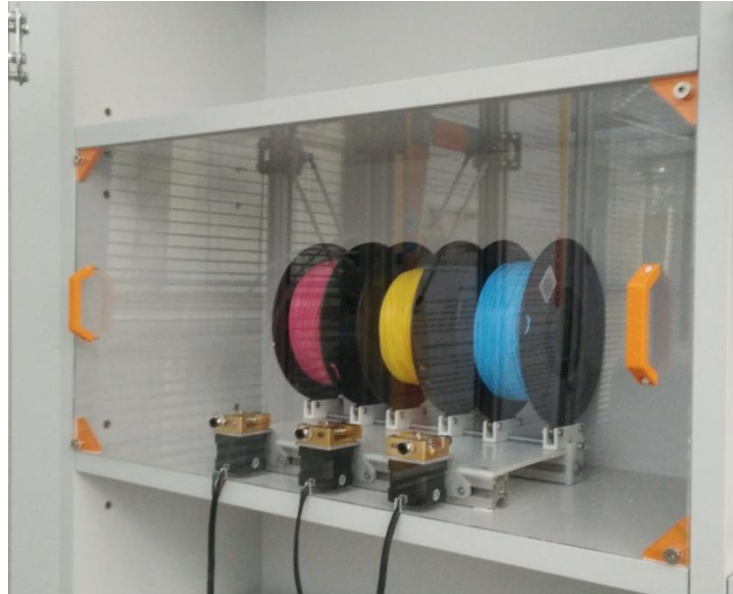


Figura 18 - Prateleira isolada para os filamentos.

Esta máquina encontra-se organizada segundo uma estruturação definida aquando da sua criação, apresentada esquematicamente na Figura 19. É a partir deste esquema que irá ser realizada a avaliação por módulos com a finalidade de se obter informação organizada.

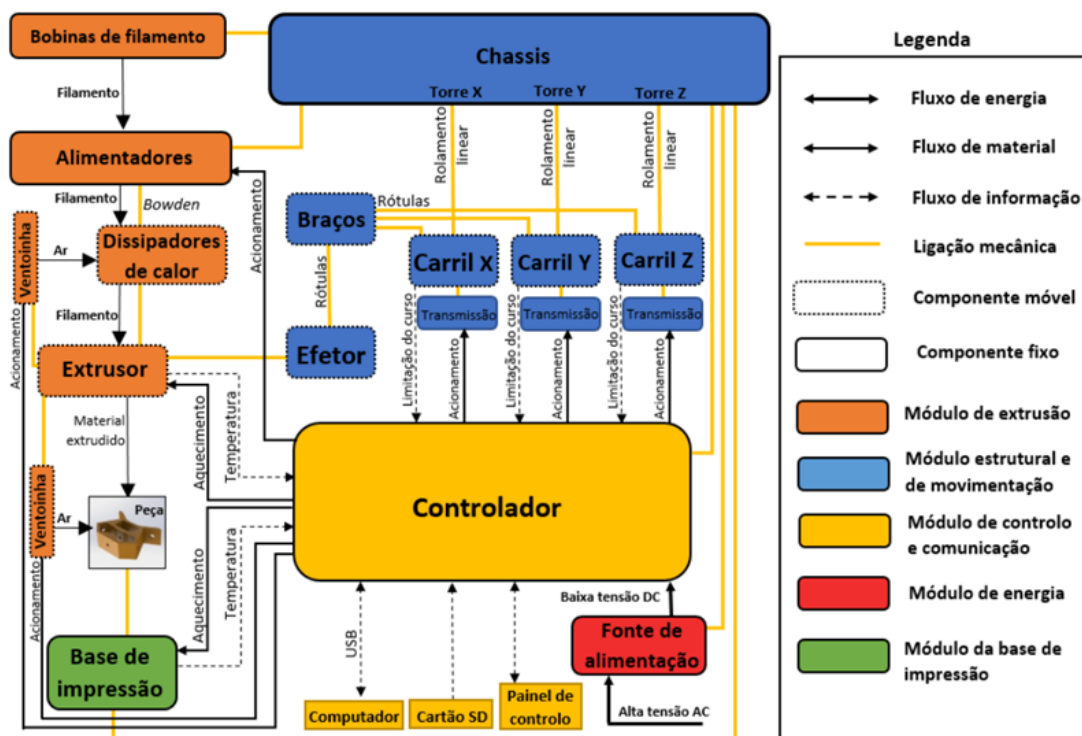


Figura 19 - Arquitetura da impressora 3D do tipo Delta (Abreu 2017).

## Trabalho experimental



### 3 Metodologia: Análise da impressora 3D

Inicialmente foram estudados todos os pormenores sobre a impressora de trabalho. Após a análise dos trabalhos futuros de Brandão (2018) e Regadas (2017), concluiu-se que iria ser necessário fazer uma revisão à impressora na tentativa de encontrar os problemas citados nas dissertações anteriores.

Após adquirir conhecimentos na área de impressão 3D foi possível realizar uma análise geral desta impressora verificando-se alguns problemas:

- O filamento utilizado encontrava-se quebradiço e frágil;
- A impressora não se encontrava configurada pois, após a troca das rótulas dos braços da impressora, as dimensões encontravam-se alteradas e não correspondiam às dimensões definidas no *firmware*;
- Era necessária uma nova calibração para corrigir todos os parâmetros da impressora;
- A movimentação do bico extrusor tinha um erro aproximado de  $\pm 0,5$  mm;
- Verificou-se a existência de escorregamento no módulo de extrusão do filamento de PLA;
- A placa de controlo e a fonte de alimentação situavam-se debaixo da base de impressão, no interior dos perfis. Isto provocava um grande aquecimento destes sistemas e um difícil acesso, descalibrando toda a base de impressão;
- Limitações do *software* para realização de mistura de cores;
- Versão do *software* e do *firmware* desatualizadas;
- Base de impressão ligeiramente deformada.

Posto isto, este capítulo retratará cada um destes problemas e estuda formas de resolver os problemas propondo algumas soluções.

#### 3.1 Filamento de PLA de três cores

O filamento utilizado é o mesmo filamento que se utilizou para o estudo da impressão de cor e comparação de propriedades, realizado na dissertação anterior. Utilizou-se as cores amarelo, magenta e ciano, como mostra a Figura 20. Estes são filamentos da marca BQ, dos quais, a ficha técnica encontra-se no Anexo A.

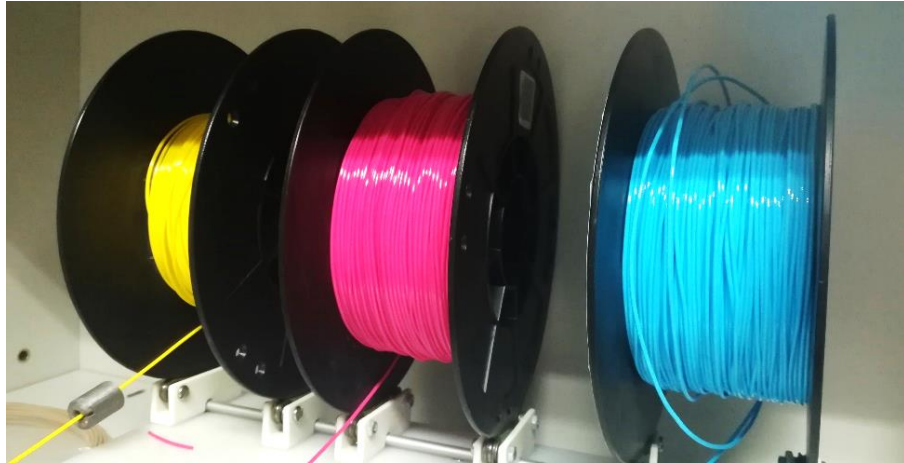


Figura 20 - Filamentos de PLA utilizados.

O PLA utilizado apresenta características higroscópicas, ou seja, consegue absorver umidade quando armazenado em condições atmosféricas não controladas. Desta forma, como o filamento a utilizar encontrava-se parado há cerca de um ano e apresentava-se pouco resistente e quebradiço, houve a necessidade de submeter os filamentos a um tratamento de secagem.

O tratamento de secagem dos filamentos consiste no enfraquecimento e libertação da união das ligações intermoleculares entre a água e o polímero. No caso do PLA, a temperatura de secagem é de 45°C com um estágio superior a quatro horas (Filament2Print 2016).

Como visto no capítulo 2.5, as condições de armazenamento e a absorção da água provocam uma grande variação nas propriedades do material extrudido, sendo, por isso, importante manter este material com as melhores condições de humidade relativa.

### 3.2 Configuração e calibração da impressora

Uma vez que o *firmware* utilizado é o *Marlin*, é lá que se vão encontrar todas as configurações necessárias para o funcionamento da impressora Delta. Assim, quando é necessário realizar alguma alteração nas configurações deste *software*, abre-se o separador “*configuration.h*” e é lá que se modificam os parâmetros que estão diretamente relacionados com todo o sistema da impressora.

Após o tratamento de secagem realizou-se uma calibração do sistema de extrusão. Para isso, extruiu-se, através do *Pronterface*, uma determinada quantidade de filamento (p.ex. 100 mm) e mediu-se a quantidade de filamento que o extrusor realmente extruiu. No caso do material extrudido não ser o estabelecido no *software*, realiza-se um cálculo de proporcionalidade para acertar os *steps* por mm do motor de extrusão. A Figura 21 mostra as alterações efetuadas e qual foi o novo valor utilizado.

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {160, 160, 160, 48.37}
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE        {100, 100, 100, 25}
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION    {2000,2000,2000,2000}
```

Figura 21 - Alterações efetuadas nos *steps* por mm do extrusor no *software Marlin*.

Devido às alterações efetuadas nos braços da impressora, houve a necessidade de realizar novas medições e alterações no *software* utilizado, de acordo com a Tabela 2. Essas alterações estão representadas na Figura 22.

```
// Print surface diameter/2 minus unreachable space (avoid collisions with vertical towers).
#define DELTA_PRINTABLE_RADIUS 100.0 // mm

// Center-to-center distance of the holes in the diagonal push rods.
#define DELTA_DIAGONAL_ROD 260.3 // mm

// height from z=0 to home position
#define DELTA_HEIGHT 610.00 // get this value from auto calibrate
//falta alterar

#define DELTA_ENDSTOP_ADJ { 0.0, 0.0, 0.0 } // get these from auto calibrate

// Horizontal distance bridged by diagonal push rods when effector is centered.
#define DELTA_RADIUS 120.0 //mm Get this value from auto calibrate
```

Figura 22 - Alterações das características geométricas da impressora efetuadas no *software* Marlin.

Neste ponto de situação é possível descarregar o código para o controlador e prosseguir com a calibração da impressora iniciando a impressão de peças.

Num processo de calibração é necessário verificar se todas as medidas estruturais estão corretas e se todos os parâmetros influenciadores da movimentação e da base de impressão estão dentro dos limites aceitáveis, para não acumular e transmitir erros que podem ser refletidos na qualidade final da peça impressa.

Inicialmente, com um nível de bolha, analisou-se se a base de impressão estava perfeitamente horizontal. A base da impressora irá ser estabelecida como ponto de referência para calibração de posicionamento do bico extrusor, que irá ter de se movimentar paralelamente à base, por isso, é importante que se encontre calibrada na horizontal.

O ajuste da horizontalidade é realizado através de parafusos de ajuste que estão instalados na placa que suporta a base de impressão. Mediante o aperto/desaperto dos três parafusos é possível nivelar a placa e garantir a horizontalidade da mesma, como se observa na Figura 23. Além disto, deve-se confirmar, também, se a base de impressão se encontra nivelada em todas as direções.



Figura 23 - Correção do nível da base de impressão.

Numa segunda fase de calibração, é necessário analisar qual é o tipo de trajetória que o bico extrusor faz relativamente à base de impressão. Tal como se encontra descrito na dissertação de Brandão (2018), o movimento do bico pode ser convexo, côncavo ou plano. No caso de realizar uma trajetória côncava significa que o valor *Delta\_Radius* está demasiado baixo, de outra forma, no caso de realizar uma trajetória convexa significa que o valor de *Delta\_Radius* está demasiado alto relativamente ao valor real.

Para o bico extrusor movimentar-se numa trajetória plana à mesa é necessário obter um valor correto de *Delta\_Radius*. Este valor pode ser encontrado através da realização de várias iterações e várias verificações de movimentação, até chegar ao valor exato. Este parâmetro pode ser alterado diretamente no *firmware Marlin*, como se pode verificar na Figura 22 ou então alterar através de programas de interface, como é o caso do *Pronterface*. Neste programa, através do código M665 Rx é possível alterar o valor do *Delta\_Radius*, em que “x” representa o novo valor a averiguar.

Após esta verificação dos parâmetros anteriormente referidos, é necessário verificar a compensação dos sensores de fim-de-curso localizadas no fim das torres de movimentação. Deste modo, é necessário aproximar o bico extrusor aos pontos mais próximos de cada torre de movimentação, à qual ir-se-á realizar a compensação.

Os pontos A, B e C correspondem respetivamente às torres XX, YY e ZZ:

- Ponto A de coordenadas (-86.60, -50.00, 00.00)
- Ponto B de coordenadas (86.60, -50.00, 00.00)
- Ponto C de coordenadas (0.00, 100, 00.00)

Para se iniciar a compensação dos fins-de-curso é preciso registar os valores que foram utilizados anteriormente, que podem ser retirados através do *Pronterface*. Estes valores irão ser posteriormente compensados.

Inicialmente, o controlador requer que se identifique em que ponto se localiza espacialmente. Para isso, obriga-se a que todos os motores de movimentação subam até encontrarem os seus respetivos fins-de-curso. A partir daí, o controlador identifica a posição máxima da impressora e define a altura de acordo com o valor fornecido em *Delta\_Height*, estabelecido e configurado anteriormente no *Marlin*.

Seguidamente, e com a base de impressão aquecida à temperatura de impressão, movimenta-se o extrusor para o ponto A, a uma determinada distância acima da base. Com auxílio de uma folha de papel<sup>1</sup> aproxima-se o bico extrusor até sentir atrito entre este e a folha. Nesse momento, regista-se o valor de altura lido através do *software*. Assim, ao valor inicial de compensação do fim-de-curso XX subtrai-se o valor registado, retirando assim o novo valor de compensação deste fim-de-curso. Este procedimento é realizado, da mesma forma, para os pontos B e C. De modo a obter-se uma boa precisão é necessário realizar este processo até que não seja necessário realizar mais compensações, ou seja, até que todos os pontos tenham uma altura de 0 mm da base de impressão.

Todos os comandos necessários para efetuar esta operações encontram-se registados na Tabela 3.

---

<sup>1</sup> É utilizada uma folha de papel pois esta tem uma espessura muito próxima da altura necessária para se iniciar a impressão (0.1 mm) (Bell 2015)

Tabela 3 - Comandos utilizados na calibração da impressora

| COMANDO           | DESCRIÇÃO  |
|-------------------|--|
| <b>M665</b>       | Obter valores da geometria da impressora                                 |
| <b>M666</b>       | Retorna os valores de compensação dos fins-de-curso (X Y Z)              |
| <b>G28</b>        | Movimentar para a posição máxima de impressão (Detetar os fins-de-curso) |
| <b>G1 X Y Z</b>   | Movimentar para umas determinadas coordenadas em X, Y e Z                |
| <b>M114</b>       | Leitura de coordenadas   |
| <b>M666 X Y Z</b> | Indicar as novas compensações de fim-de-curso nos eixos X Y Z            |
| <b>M500</b>       | Guardar a nova informação  |

No final deste conjunto de procedimentos, verificou-se que, na origem do referencial da impressora, havia uma variação dimensional da direção z de cerca de  $\pm 0,5$  mm.

Nota: A calibração dos motores passo-a-passo da movimentação não foi efetuada pois assumiram-se os valores anteriores.

### 3.3 Observação das impressões realizadas




Após a calibração, iniciou-se a impressão de peças normalmente utilizadas para verificação da calibração, com a finalidade de encontrar os melhores parâmetros e conseguir a impressão de várias cores em simultâneo.

No decorrer das impressões, algumas das peças tiveram de ser iniciadas várias vezes pois o material depositado não aderiu à base de impressão, uma vez que a posição do bico extrusor apresentava um erro aproximado de  $\pm 0.5$  mm na direção vertical.

Na realização da impressão foi possível identificar uma série de defeitos que se projetavam na peça. Assim sendo, fez-se uma breve avaliação do possível problema e tentou-se resolver os problemas recorrendo a páginas web de impressão 3D - Simplify3D (2019) e Jennings (2019).

Na Tabela 4 estão enunciadas todas as peças impressas e, juntamente com estas, irá ser tecido um comentário sobre a qualidade de impressão. No caso de ser possível identificar diretamente o problema, será referida a solução utilizada.

Tabela 4 - Análise das impressões realizadas

| # | Peça realizada   | Observações  |
|---|--|--|
| 1 |  <p>Figura 24 - Cubo 20 mm com filamento de cor ciano.</p>                                | <p>Imprimiu-se um cubo simples, Figura 24. Neste caso utilizou-se uma altura de camada de 0.3 mm.</p> <p>Este cubo apresentava umas das arestas com elevado material depositado e, na superfície de topo e verificava-se a existência de aberturas entre os filamentos.</p> <p>O primeiro defeito pode ser explicado através de erros existentes na configuração do programa de fatiamento e pela altura de camada. O segundo é explicado pela baixa percentagem de preenchimento do cubo.</p>   |
| 2 |  <p>Figura 25 - Cubo XYZ com multiplicador de extrusão de 1.1 (iDig3Dprinting 2016).</p> | <p>Nesta impressão verificou-se uma elevada quantidade de material extrudido, Figura 25. O principal parâmetro responsável pela quantidade de material extrudido é o multiplicador de extrusão. O valor que estava a ser utilizado era de 1.1 e alterou-se para 0.9.</p> <p>Foi testado também um multiplicador de extrusão de 1.0 que também apresentou o mesmo problema.</p>   |
| 3 |  <p>Figura 26 Cubo XYZ 20 mm multiplicador de extrusão 0.9 (iDig3Dprinting 2016).</p>   | <p>Foi impresso um cubo XYZ que tem já uma altura de camada de 0.2 mm e um multiplicador de extrusão de 0.9, Figura 26.</p> <p>É possível observar que, na camada superior, não foram preenchidos todos os espaços. Isto pode-se tratar de um problema de baixa quantidade de material extrudido, ou então, o diâmetro do filamento está mal definido. Como foi explicado por Brandão (2018), este parâmetro não deve ser alterado uma vez que se utiliza três filamentos que podem apresentar diâmetros variáveis, no entanto, tudo na ordem das décimas. Contudo, o diâmetro de referência fornecido pelo fornecedor dos três filamentos é de 1.75 mm.</p> |

4



Figura 27 - Cubo XYZ com defeitos de borra (iDig3Dprinting 2016).

Este cubo, da Figura 27, assim como todos os impressos anteriormente, apresentam “borrões” distribuídos ao longo das camadas de forma aleatória. Estes defeitos aparecem essencialmente devido à resistência causada pelo tubo de *Bowden* aquando a retração e pelo comprimento do filamento fornecido pelo motor até ao bico extrusor, isto faz com que a deposição de material seja inconstante.

Os defeitos podem também estar relacionados com a altura de camada e a largura de extrusão, que podem ter valores incorretos.

Outra possibilidade pode consistir no sistema de extrusão que não é capaz de extrudir constantemente o filamento.

5

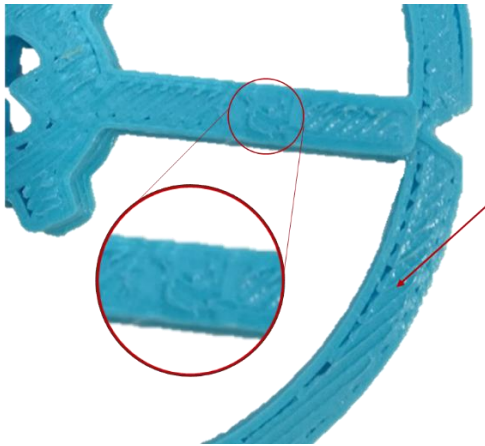


Figura 28 - Calibrador de impressoras Delta (dolpin 2015).

Num calibrador utilizado em impressoras Delta, Figura 28, verificou-se que o bico extrusor extrudia ao mesmo tempo que “borrava” o material depositado, ou seja, o material parecia estar num estado pastoso. Não foi possível identificar os pormenores na peça, por exemplo a letra “X” que aparece completamente impercetível. Em contrapartida é possível verificar zonas com falta de material.

6



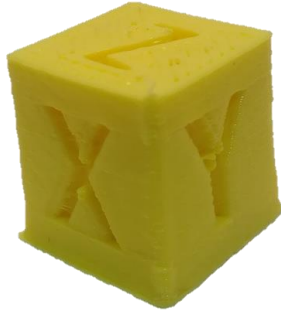
Figura 29 - Cubo XYZ 20 mm com filamento cor magenta (iDig3Dprinting 2016).

Utilizou-se um outro filamento de cor diferente, magenta, numa tentativa de verificar se o mesmo erro ocorria ou se era provocado pela falha dos sistemas a montante do sistema de deposição do material, como demonstra a Figura 29.

Verificam-se os mesmos erros, eliminando o facto de o erro estar relacionado com o sistema de extrusão.



7



Efetuuou-se o teste para a cor amarela com o mesmo objetivo da peça anterior, obtendo-se os mesmos resultados, Figura 30.

Figura 30 - Cubo XYZ 20 mm com filamento cor amarela (iDig3Dprinting 2016).

---

8



Realizou-se um teste ao comportamento das três cores em simultâneo, Figura 31.

O bico extrusor realizava a descarga da cor no interior da peça e não se fazia denotar na sua superfície. No entanto, o filamento ciano, apresenta problemas relacionados com o escorregamento do sistema de extrusão e problemas de transição de cor.

Figura 31 - Paralelepípedo de três cores.

---

9



Figura 32 - Falha em paralelepípedo de três cores.

---

Foi realizada uma segunda tentativa, Figura 32, com alguns parâmetros ajustados, e a peça realizada teve de ser interrompida, uma vez que o sistema de extrusão do filamento de cor ciano deixou de funcionar. A temperatura poderia ser um problema, no entanto, a extrusão estava a ser realizada a 200 °C.

10



Figura 33 – Vaso Júlia interrompido (virtox 2012).

---

Na realização de uma peça complexa, o vaso Júlia, verificou-se os problemas anteriores de borra do filamento e mau acabamento superficial, Figura 33.

Verificou-se também problemas relacionados com a realização de má retração: nas zonas amarelas encontram-se pequenas quantidades de magenta e vice-versa.

Foi verificado um problema de desalinhamento de impressão.

---



11



Figura 34 – Desalinhamento nas torres de purga.

A torre de purga da peça da Figura 33, é possível analisar o desalinhamento ocorrido, como é possível observar a Figura 34. Após 21.30 mm de altura, acontece o primeiro desalinhamento durante uma altura de 2.50 mm, retornando depois à posição inicial. Após 3.40 mm de altura, acontece um novo desalinhamento. A partir daí houve a necessidade de interromper a impressão.

Normalmente, os erros de desalinhamento ocorrem devido a pequenos pormenores mecânicos ou elétricos, no entanto, não havendo uma nova calibração, existem poucas probabilidades de a impressão voltar à posição que deveria estar inicialmente, que é o que acontece com a peça anterior. Por isso, supôs-se que o problema poderia estar relacionado com o controlador ou com os *drivers*.

12



Figura 35 - Vaso Starelt interrompido (David\_Mussaffi 2016).

De forma a descartar problemas relacionados com o ficheiro STL ou com o programa de fatiamento, realizou-se outra tentativa de uma nova peça complexa, Figura 35.

Nesta peça verifica-se um excesso de deposição de material onde se ocorria a mudança de direção do bico extrusor.

Após a análise das peças impressas foram colocados em questão os vários sistemas pertencentes à impressora. Um dos sistemas em que foi possível identificar diretamente através da verificação do comportamento durante a impressão, foi o sistema de extrusão. O motor não conseguia realizar a extrusão pois, o comportamento analisado, apontava para uma presumível falta de binário. O filamento chegava a ficar moído na zona de extrusão.

Outros problemas verificados diretamente foram os problemas relacionados com a má retração do material. Estes problemas também poderiam ser explicados pelo mau funcionamento do sistema de extrusão, bem como pelo atrito causado pelos tubos de *Bowden*, pelo comprimento de filamento entre o motor de extrusão e o bico extrusor, ou pelo mau controlo realizado.

Um problema que é pouco enunciado pelos internautas de impressão 3D é o desalinhamento momentâneo, com retorno à posição inicial. Este fator pode ser explicado pela baixa resolução do controlador escolhido para uma impressora com diversos componentes de

controle de elevada precisão ou, então, pelas más condições a que o controlador estava sujeito, pois, com o sobreaquecimento do controlador ou dos *drivers* existe grande possibilidade de induzir a um mau funcionamento do sistema.

Devido aos problemas acima enunciados, não foi possível verificar a existência destes erros para peças de maiores dimensões. Isto impossibilitou também de verificar se os problemas verificados anteriormente eram proporcionais à dimensão da peça.

Em suma, existem dois grandes problemas identificados nos sistemas de extrusão e de controle, por isso, existe uma necessidade de estudo para se verificar a melhor possibilidade para dar resposta às questões encontradas.

### 3.4 Escorregamento no sistema de extrusão

Os problemas de escorregamento foram claramente verificados na Figura 31 e na Figura 32, em especial no filamento de cor ciano. Assim sendo, houve a necessidade de pesquisa da explicação para a ocorrência deste problema.

N. Turner, Strong, e A. Gold (2014) fizeram um estudo acerca do processo de extrusão. Os autores explicam que, através de modelos simples é possível calcular o binário e a potência do motor para atingir uma taxa de alimentação do filamento. O deslizamento entre a polia dentada e o filamento foi considerado como sendo uma função das características da superfície da polia e da matéria prima, e da pressão exercida pela polia.

Assim, N. Turner, Strong, e A. Gold (2014) salientam a ocorrência de enrugamento do filamento entre o extrusor e o bico extrusor provocada pela pressão crítica ( $P_{cr}$ ) no interior do bico:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E d^2}{16 L^2} \quad (1)$$

Onde, E é o módulo de elasticidade do material, d é o diâmetro do filamento e L é o comprimento de filamento entre o extrusor e o bico extrusor. Esta pressão pode provocar uma força contrária à do sistema de extrusão, provocando escorregamento.

Na equação 1 é possível verificar que a pressão crítica pode ser atingida muito facilmente pois, no caso da impressora em estudo, o tubo de *Bowden* é demasiado longo, cerca de 800 mm e se este não se encontrar ajustado ao filamento provoca enrugamento. Este enrugamento causado pela pressão crítica vai aumentar a dificuldade de extrusão.

Assim sendo, e de acordo com a explicação anterior, a solução seria diminuir os tubos de *Bowden* criando uma solução em que os motores de extrusão trabalhassem paralelamente ao bico extrusor. Para tal, seria necessário criar um sistema de movimentação dos motores através de carris e braços que se deslocassem em simultâneo com o sistema de movimentação do efector. Consequentemente, os motores iriam ter de suportar uma carga maior do que a carga inicialmente dimensionada, pelo que, seria recomendado redimensionar todos os motores de movimentação.

Poder-se-ia também adquirir tubos que contrariassem o efeito de enrugamento, sendo necessário seleccionar tubos que fossem completamente ajustados ao filamento, provocando o menor atrito possível, ou então tubos de maior rigidez.

A taxa de extrusão do filamento é controlada de modo a manter um caudal volúmico constante no bico de impressão,  $Q$ . A velocidade de extrusão pode ser simplesmente relacionada com os parâmetros de aperto da polia, assumindo que não há escorregamento. Neste caso, a velocidade de avanço pode ser expressa como (Bellini, Güçeri, e Bertoldi 2004):

$$v = \frac{Q}{l h} \quad (2)$$

E,

$$v = \omega \cdot R \quad (3)$$

Onde,  $v$  é velocidade de avanço linear do filamento,  $\omega$  é a velocidade angular,  $R$  é o raio da polia,  $l$  é a largura de deposição e  $h$  é a altura de camada.

Um deslizamento entre a polia e o filamento provoca uma falta de material depositado. Por isso é necessário calcular o binário( $\Gamma$ ) necessário para extrusão do material e a potência,  $P$  (Bellini, Güçeri, e Bertoldi 2004):

$$\Gamma = \frac{F}{2} R \quad (4)$$

E,

$$P = \omega \Gamma \quad (5)$$

Assume-se que se utilizam dois motores, fornecendo potência para o mecanismo da polia na equação 5.

Assim, com o mesmo motor, é possível aumentar o binário diminuindo a velocidade angular,  $\omega$ . Através do esquema da Figura 36 tem-se que:

$$\omega_1 R_1 = \omega_2 R_2 \quad (6)$$

Substituindo na equação 5, tem-se

$$P = \frac{\omega_1 R_1}{R_2} \Gamma_2 \quad (7)$$

Então, para adquirir um  $\Gamma_2 > \Gamma_1$  tem-se de obter  $\frac{R_1}{R_2} < 1$ , para a mesma potência de modo a utilizar o mesmo motor.

Este tipo de sistemas, chamados sistemas planetários, é muito aplicado pelos utilizadores de impressoras Delta. Existem ainda fabricantes de produtos que aumentam a relação de transmissão de sistema semelhante, é o exemplo da marca BoundTech®.

A relação de redução refere-se à relação entre o binário fornecido pelo motor e a velocidade de rotação do motor. Para uma razão de redução equilibrada é essencial que a extrusora seja capaz de alimentar impressões de extrusão e retração relativamente rápidas.

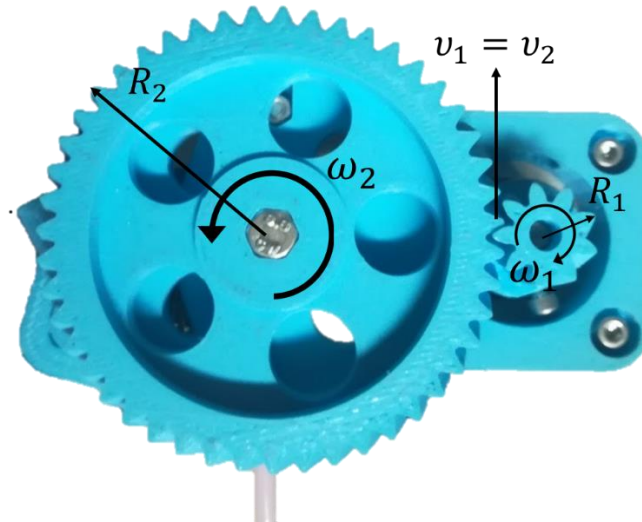


Figura 36 - Esquema representativo do aumento do binário.

Outra solução seria dimensionar um novo motor que consiga extrudir o material de forma mais eficaz, escolhendo assim um motor de potência suficiente para extrusão de filamento, sendo que a nova potência seria calculada recorrendo à seguinte fórmula:

$$P = \frac{QR^2}{lh} \cdot \frac{F}{2} \quad (8)$$

Tendo em conta as soluções acima propostas, será estudado no capítulo 4.2 o grau de fiabilidade das resoluções juntamente com a análise de custos associados.

### 3.5 Estudo sobre controladores

Pela observação da Figura 33 e da Figura 34 deparou-se um certo desalinhamento temporário da impressão da peça. Este tipo de desalinhamento com o posterior retorno à posição normal não é muito normal entre os erros de impressão. Por isso, foi posta a possibilidade da placa de controlo não estar a funcionar normalmente.

Deliberou-se, então, a possibilidade de alteração da placa de controlo como forma de solucionar o problema encontrado e de forma a atualizar o *firmware* da impressora 3D a trabalhar. Posto isto, foi necessário estudar todas as características de placas de controlo, com o objectivo de melhorar as propriedades apresentadas na placa utilizada.

Na escolha dos vários tipos de controladores irá ter que se ter em conta a oportunidade de atualizar o *firmware* para um mais recente. Estudar a oportunidade de se conseguir, posteriormente introduzir um extrusor com entrada para cinco filamentos e, ainda, a possibilidade de misturar facilmente todas as cores. Estas e outras extras serão tidas em conta na escolha do controlador.

A *RAMPS 1.4* de 8bits foi a placa implementada na dissertação inicial, fornecida pela RepRap. Esta é uma placa de extensão do controlador utilizado, *Arduino Mega 2560*, e efetua a interação com todos os dispositivos eletrónicos da impressora. A *RAMPS* utiliza *steppers drivers* adquiridos à parte e montados no controlador (RepRap.org 2019c). No caso da impressora em questão, são utilizados três *drivers* para movimentação dos carris nas torres XX, YY e ZZ e ainda um *driver* por cada motor de extrusão. Os *stepper drivers* utilizados para

movimentação são os *DVR8825* com *microstepping* 1/32 e os utilizados na extrusão são os *A4988* com *microstepping* de 1/8. Na Figura 37, é demonstrado o controlador *Arduíno* com a placa de extensão *RAMPS*, os *drivers* instalados e ainda uma outra placa de extensão para implementar o *driver* para o terceiro motor de extrusão

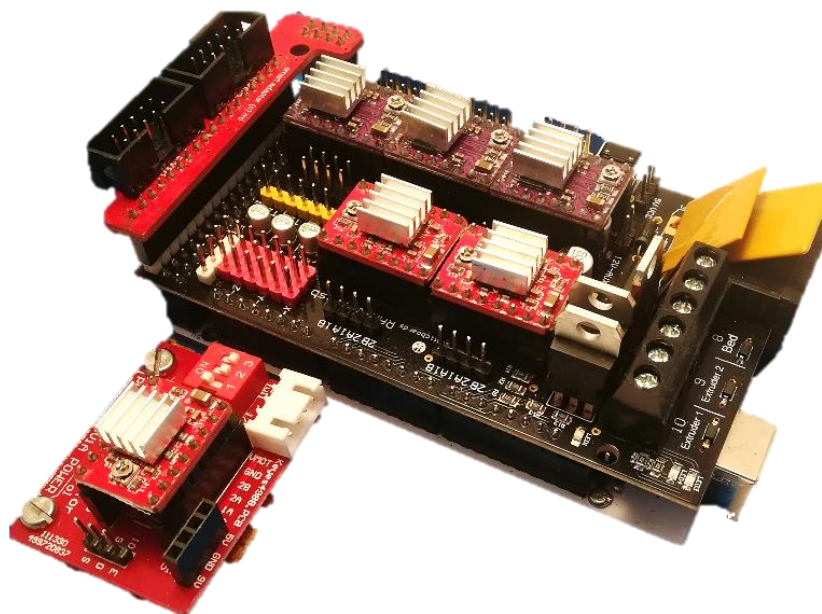


Figura 37 – Conjunto do *Arduíno*, *RAMPS* 1.4 e placa de extensão.

A *RADDS (RepRap Arduino-Due Driver Shield)* é uma versão muito similar à *RAMPS*, contudo tem a vantagem de, com 32bits, poder processar mais dados e ajudar a impressora 3D a imprimir mais rápido e com melhor precisão. Os *stepper drivers* são adquiridos à parte podendo assim ser possível escolher a resolução suportada pela placa (RepRap.org 2019a).

A placa *RAMBo 1.4 (RepRap Arduino-Mega-compatible Mother Board)* é uma placa que integra o *Arduíno*, o design da *RAMPS* e os *stepper drivers*, todos num só componente. Esta placa é uma boa alternativa à eletrónica *RAMPS* que traz um *design* melhorado no que diz respeito às diversas conexões. Esta placa tem um processamento de 32bits e um *microstepping* dos *drivers* é de 1/16. Tanto esta placa como a *RAMPS* utilizam o *firmware* *Marlin* ou *Reptier* (RepRap.org 2019b).

*Smoothieboard v1* foi uma das primeiras placas de controlo de 32bits a aparecer no mercado. Isto é uma especificação importante uma vez que as placas de 8bits podem ocorrer em problemas quando é requerido cálculos complexos, especialmente, quando se trata de impressoras 3D de geometria complexa ou então de extrusores duplos. Uma das propriedades complementares é o facto desta placa possuir o seu próprio *firmware*. O *Smoothieware* é um *software* comparável ao *Marlin* ou *Repetier*, mas apresenta a mais valia de ser fácil de configurar. Este controlador tem três versões - 3X, 4X e 5X - que podem suportar 3, 4 e 5 motores de passo, respetivamente. Estes motores são controlados com *stepper drivers* de 1/32 *microstepping* (Smoothieware.org 2019). No entanto, esta placa não tem nenhum revendedor ou representante em Portugal.

Os controladores *Azteeg* podem divergir em vários tipos X1, X3, X3Pro, X5 e X5mini de acordo com a complexidade e o número de *stepper drivers*. É um controlador baseado no



*Smoothieboard* que utiliza o *firmware* Marlin, Repetier ou, inclusive, o *Smoothieware*. Todavia, pela comparação de qualidade vs preços requeridos, as placas de 32bits são as que melhor satisfazem o consumidor final. O *Azteeg X3PRO* é um controlador que permite a utilização de oito motores, com *stepper drivers* adquiridos à parte, dos quais cinco extrusores. Tem oito termístores de alta tensão para instalação de extrusores, ventoinhas ou LEDs (Devices 2019). Este controlador não tem nenhum revendedor em Portugal.

A *DUET* é uma nova marca de placas que tem a sua própria interface onde é possível atualizar e configurar via internet a impressora. O controlador *DUET 2 Ethernet*, representado na Figura 38, sustenta dois extrusores na placa principal, sendo que através de uma placa de extensão desta marca é possível ter até sete extrusores e ainda outro tipo de entradas para *endstops*, leds, ventoinhas e para mais blocos de aquecimento. O *firmware* tem a vantagem de possibilitar a fácil configuração de mistura de cores. Esta placa de 32bits é muito utilizada no universo de impressoras 3D tipo Delta e, tal como a *Smoothie* e a *Azteeg*, é de *software* aberto. O código encontra-se no site da GitHub possibilitando assim a alteração do mesmo caso necessário (Duet3D 2019).

Além do mais, os criadores da *DUET* tiveram a necessidade de criar um site organizado com todos os tutoriais e com todas as informações necessárias para uma boa prática com a utilização de impressoras que têm como placa controladora a *DUET* (Dozuki 2019).

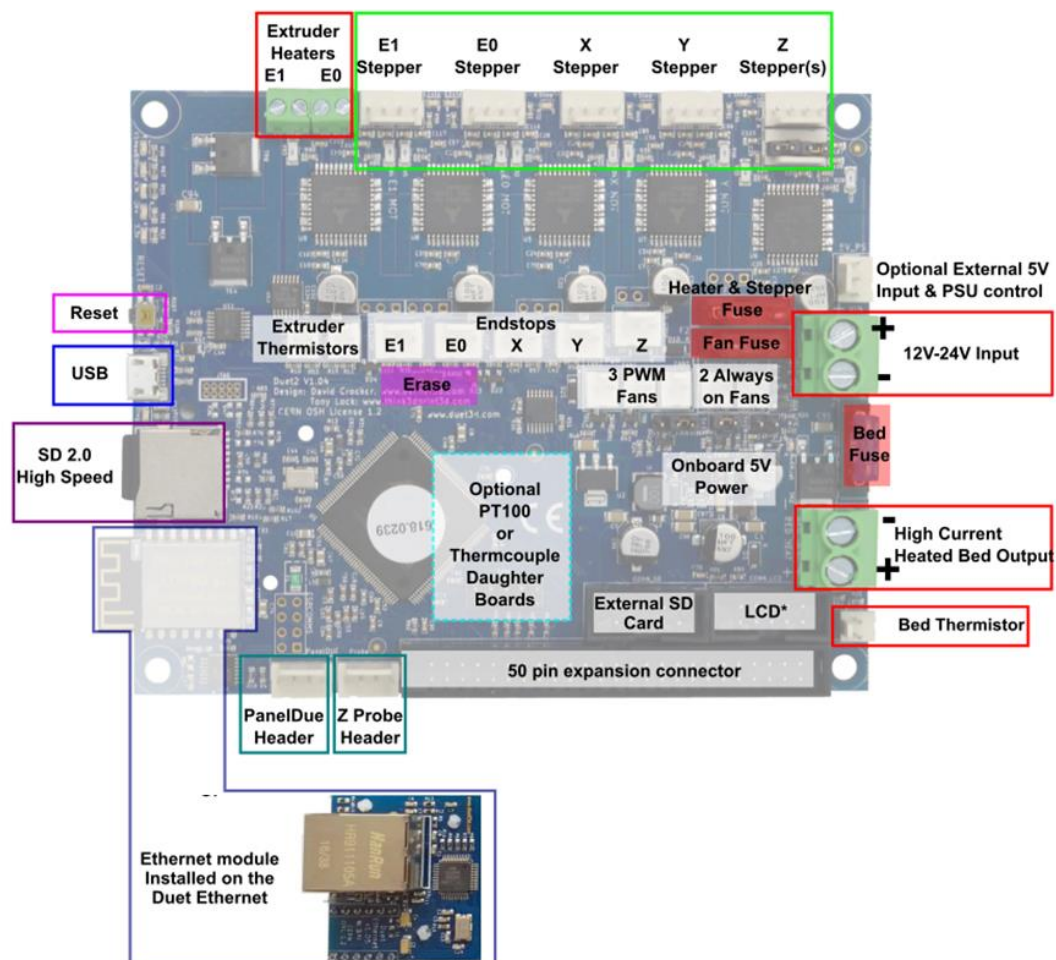


Figura 38 – Diagrama da placa *Duet 2 Ethernet v1.03* ou superior (Dozuki 2019).

A *mainboard MKS SBASE 1.3* é uma placa de controlo principal de 32bits. É compatível com os *firmwares Marlin*, Repetier e outros. Consegue suportar correntes de 12V-24V e possui cinco *stepper drivers* do tipo *OnBoard DRV8825* com seis diferentes resoluções (de 1step a 1/32 steps) e ainda, para cada motor de movimentação, é possível associar dois fins de curso. Traz a possibilidade de trabalhar com dois extrusores. Esta placa tem um ecrã LCD tátil associado, de entrada USB que faz com que seja de fácil utilização e com uma boa interface. Nesta *mainboard* encontra-se apenas uma saída para ventoinhas, sendo que se for necessário acrescentar mais ventoinhas teria que se acrescentar uma placa de extensão (3DAddicted 2018b).

*Archim 1.0* é uma versão actualizada da placa *RAMBo* com um microprocessador de 32bits, *Atmel SAM3X8E*. Possui cinco *stepper drivers* do tipo *DRV8825* com *microstepping* de 1/32. Têm seis *mosfets*, dos quais, dois para ventuinhas, três para extrusores e um para a base de impressão aquecida. O controlador aceita uma entrada de tensão entre 10V-24V e possui três fusíveis independentes que protegem o circuito. Esta placa foi projetada para ser compatível com o *firmware Marlin4due*, mas é também compatível com o *g2 firmware*, *RepRapFirmware* e *Repetier Firmware* (UltiMachine 2017).

Lerdge-K é uma placa mais pequena que utiliza um controlo de 32bits, ARM Cortex M4 STM32F4. Este controlador apresenta entrada para seis *stepper drivers* que são adquiridos à parte. Ao contrário de muitos controladores, este tem várias conexões on/off para detetar limites: fins-de-curso, nivelção automática e módulo detecção do filamento para cada extrusor. O design é apresentado com o intuito de proteger a placa pois esta pode funcionar com uma tensão de 8V a 35V. Tem ainda a possibilidade de instalar cinco ventuinhas e dois LEDs. Para esta placa existe um ecrã LCD touch. Esta placa apresenta um *firmware* privado, não sendo possível efectuar alterações (LERDGE 2018).

A placa *Replicape* corre com o controlador *BeagleBone Black*. Este é controlador de 32bits de processamento tipo *ARM Cortex-A8 AM335x*. A placa de extensão *Replicape* é muito versátil, utiliza cinco *stepper drivers* silenciosos com resolução de 1/256, do tipo *TMC2660*. Tem ainda dois *servos* (motores que são melhor controlados), quatro ventoinhas, aquecimento da base e dois extrusores. Este conjunto é muito utilizado em impressoras tipo Delta (AS 2017).

Por conseguinte, para além dos controladores apresentados anteriormente, é possível encontrar outro tipo controladores. Ainda assim, é apresentado na Tabela 5 de forma resumida os controladores referidos.

Tabela 5 - Comparação de propriedades entre vários tipos de placas de controlo (3DAddicted 2018a)

| <b>Placa</b>                                  | <b>Preço aprox.</b> | <b>Tipo de processador</b> | <b>Stepper drivers</b> | <b>Nº Drivers</b> | <b>Tipo de firmware</b> | <b>Bits</b> | <b>Micro-stepping</b> |
|---|---------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|
| <b><i>DUET 2 Ethernet</i></b>                 | \$168               | ARM-Cortex M4 SAM4E8E      | Na placa TMC2660       | 5                 | Open-Source             | 32          | 1/256                 |
| <b><i>Replicape with BeagleBone Black</i></b> | \$149               | ARM Cortex-A8 AM335x       | OnBoard TMC2100        | 5                 | Open-Source             | 32          | 1/256                 |
| <b><i>Arduino DUE with RADDs 1.5</i></b>      | \$72                | ARM-Cortex M3 SAM3X8E      | Externo                | 6                 | Open-Source             | 32          | -                     |
| <b><i>Smoothieboard 4x</i></b>                | \$135               | ARM-Cortex M3 LPC1769      | Na placa A5984         | 4                 | Open-Source             | 32          | 1/32                  |
| <b><i>Archim 1.0</i></b>                      | \$170               | ARM-Cortex M3 SAM3X8E      | Na placa DRV8825       | 5                 | Open-Source             | 32          | 1/32                  |
| <b><i>MKS SBASE 1.3</i></b>                   | \$61                | ARM-Cortex M3 LPC1768      | Na placa DRV8825       | 5                 | Open-Source             | 32          | 1/32                  |
| <b><i>Panucatt Azteeg X3 PRO</i></b>          | \$135               | Atmel Atmega 2560          | Externo                | 8                 | Open-Source             | 32          | -                     |
| <b><i>Arduino Mega 2560 + RAMPS</i></b>       | \$80                | Atmel Atmega 2560          | Externo                | 5                 | Open-Source             | 8           | -                     |
| <b><i>RAMBo 1.4</i></b>                       | \$170               | Atmel Atmega 2560          | Na placa A4882         | 5                 | Open-Source             | 32          | 1/16                  |
| <b><i>Lerdge-X</i></b>                        | \$263               | ARM Cortex M4 STM32F4      | Externo                | 6                 | Privado                 | 32          | -                     |

### 3.6 Análise da deformação da base de impressão

Dada a difícil calibração da base de impressão, realizou-se um levantamento de forma e análise dos desvios dimensionais da mesma através da utilização da digitalização tridimensional, utilizando um equipamento *Artec 3D* de 0.1 mm de precisão. A partir desta digitalização foi possível avaliar dimensionalmente a base de impressão. Foram realizadas três digitalizações a temperaturas de 23 °C, 60 °C e 100 °C que representam, respetivamente, a temperatura ambiente, a temperatura da base para o PLA e a temperatura da base para o ABS.

Na Figura 39 está digitalizada a base de impressão e representadas as deformações existentes relativamente ao plano criado. O plano representa uma superfície alinhada com as bordas da mesa que, neste caso, foi tomada como referência. Assim, na figura foi possível medir a distância entre o plano criado até à superfície da mesa, averiguando-se que existe uma diferença entre os bordos e o centro da mesa de 0.6 mm.

Na Figura 40 e na Figura 41 observou-se uma dilatação constante por toda a mesa e com uma diferença de alturas, entre os bordos da base e o seu centro, de 0.7 mm e 0.8 mm respetivamente para temperaturas de 60 °C e de 100 °C.



Daqui retira-se que, para uma boa calibração da mesa, é necessário que esta esteja à temperatura de trabalho, e ainda será necessário criar uma calibração para que o plano de movimentação siga a forma da mesa. É também de efeito notório que o excesso de pressão criado pelos parafusos é a principal causa de deformação aquando o aquecimento da base.

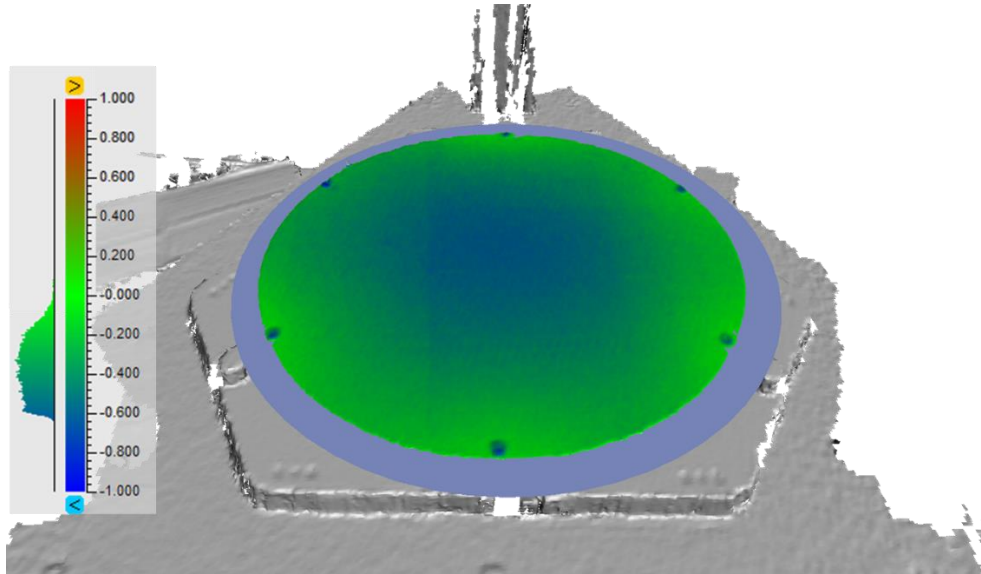


Figura 39 - Deformação da mesa à temperatura ambiente – 23 °C.

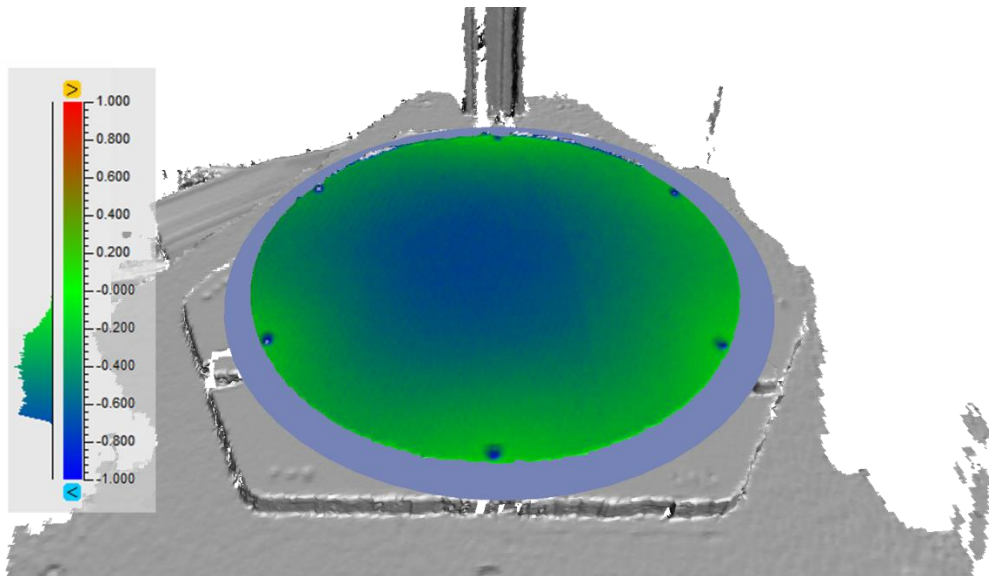


Figura 40 - Deformação da mesa à temperatura de trabalho do PLA – 60 °C.

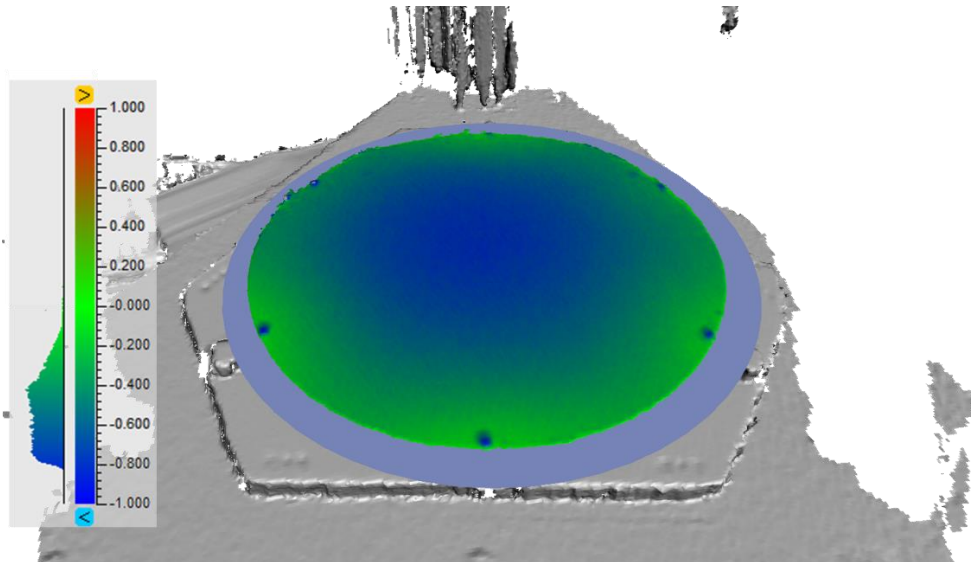


Figura 41 - Deformação da mesa à temperatura de trabalho do ABS – 100 °C.

Dado os problemas enunciados acima, havia necessidade de melhorar a base de impressão. Poder-se-ia diminuir a tensão exercida pelos parafusos sobre a base, ou então colocar uma base de outro material que tivesse boa condutividade, mas ao mesmo tempo, com baixo coeficiente de expansão térmica. Segundo Obudho (2018) a melhor solução para a base de um sistema de impressão é utilizar um vidro, uma vez que este apresenta uma primeira camada com boa qualidade e menor esforço de remoção da peça.

## 4 Desenvolvimento: Solução proposta

Após o estudo de todas as possibilidades de alteração da impressora de modo a dar resposta aos problemas encontrados, foi possível encontrar soluções que foram consideradas as mais adequadas no âmbito deste trabalho.

Todas estas soluções irão ser desenvolvidas e explicadas, neste capítulo, tendo em conta os módulos definidos da impressora e, tendo em perspectiva, vários trabalhos futuros. Assim, irá ser seguida a ordem de trabalhos demonstrada no esquema da Figura 42.

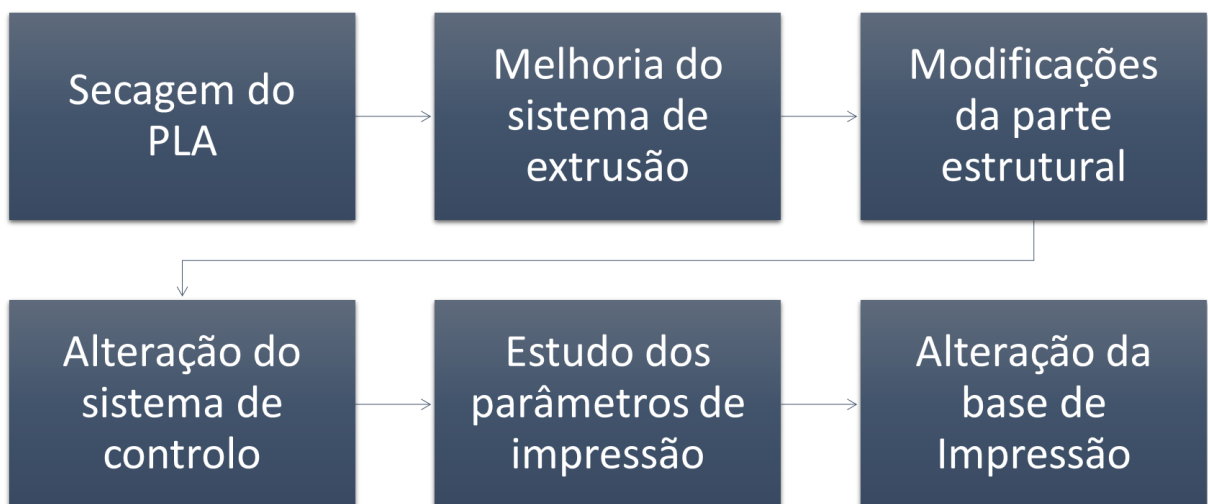


Figura 42 - Ordem de trabalhos.

### 4.1 Secagem do PLA

De modo a dar solução ao filamento de PLA que continha elevados níveis de água, foi realizada uma secagem numa mufla, *POL-EKO APARATURA*, apresentado na Figura 43, pertencente ao LDPS. Os ciclos de aquecimento consistem em aquecer o filamento até uma temperatura abaixo da sua temperatura de transição vítrea, para que não haja alterações no diâmetro do filamento das bobinas, e remover o máximo de moléculas de água que estavam agregadas ao polímero.

Realizou-se dois ciclos de um dia, uma vez que o primeiro não foi o suficiente para a secagem total. Após o primeiro ciclo, o filamento encontrava-se ainda muito quebradiço e frágil, por isso, a necessidade de realizar um segundo ciclo semelhante. No primeiro ciclo utilizou-se a temperatura de 40 °C durante 24 horas e no segundo utilizou-se a 45 °C durante 24 horas. Colocaram-se os filamentos na mufla e iniciou-se o ciclo de secagem. Posteriormente, foram retirados quando a mufla se encontrava totalmente arrefecida.



Figura 43 - Forno utilizado para realizar os tratamentos térmicos.

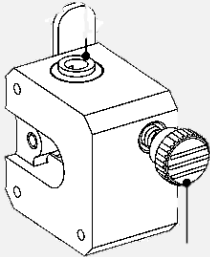

## 4.2 Sistema de extrusão

Após a análise de várias possibilidades optou-se por utilizar um sistema de redução da velocidade e, conseqüentemente, aumento do binário.

De acordo com Technologies (2019), que utiliza um motor NEMA17, a razão ideal para uma boa extrusão é de 5,18:1. Isto é, otimiza a velocidade máxima de alimentação do filamento e também as velocidades ideais de retração. O motor NEMA17 é o motor que é utilizado para extrusão do filamento na impressora em estudo.

Posto isto, fez-se uma pesquisa do tipo de sistemas que oferecem este tipo de soluções e encontrou-se dois mecanismos representados na Tabela 6. A primeira solução, criada pela BondTech®, é muito aplicada a sistemas de impressão 3D quando existe escorregamento, no entanto, é uma solução de elevado custo. Por isso, tentou-se encontrar soluções mais económicas. Assim, a segunda solução foi encontrada no site de partilha de modelos para impressão 3D. Um sistema relativamente económico em que só é necessário o filamento para impressão dos componentes e algumas peças de fixação. Este sistema tem uma relação de engrenagem de 47:9 o que oferece uma razão de redução de 5.22:1, que é muito próximo do sistema projetado pela BondTech®.

Tabela 6 - Soluções encontradas para o sistema de extrusão

|                         | PREÇO<br>APROX. | IMAGEM   |
|-------------------------|-----------------|--|
| BONDTECH®               | ↑               |  <p>Figura 44 - Parte do extrusor (Technologies 2019).</p> |
| GREG'S<br>B'WADESTRUDER | ↓               |  <p>Figura 45 - Sistema planetário (VanessaE 2016).</p>   |

Tendo em conta as características destes dois mecanismos (Figura 44 e Figura 45), foi escolhida a segunda solução pois era um sistema económico, fácil de instalar e de resolução rápida uma vez que no laboratório de trabalho (LDPS) tinha-se todos os meios para construir tudo de forma eficaz.

Imprimiu-se todas as peças realizadas por VanessaE (2016) na impressora *Alpha 8 Printer* (modelo não comercial desenvolvida por André Brandão) com uma altura de camada de 0.2 mm, a uma temperatura de extrusão de 200 °C, temperatura da base de impressão de 45°C, a uma velocidade de 80 mm/s e com um preenchimento retilíneo de 25%. Estes parâmetros foram selecionados para a construção do modelo para os três motores de extrusão. Utilizou-se os filamentos descritos no capítulo anterior e construiu-se o sistema segunda a ordem presente no Anexo B. Na Figura 46 é possível verificar a aplicação do sistema de extrusão em cada motor. Numa análise de extrusão inicial o efeito do sistema implementado foi positivo.

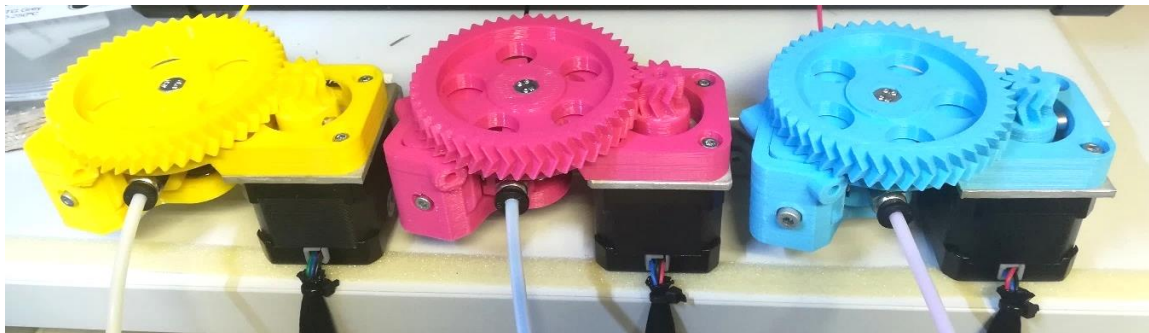


Figura 46 - Sistema de extrusão aplicado nos três extrusores.

### 4.3 Parte estrutural

Uma vez encontrados erros a nível de impressão houve também a necessidade de conferir todos os componentes estruturais. Numa análise à infraestrutura da impressora Delta foram encontrados alguns problemas que poderiam ou não influenciar o modo de impressão da mesma.

#### *Localização da placa de controlo*

O primeiro problema encontrado foi o facto de a placa de controlo estar localizada debaixo da base de impressão. Isto implicava que, para aceder ao controlador, era necessário desmontar a estrutura na qual a base estava suportada, o que levaria à necessidade de calibrar o bico extrusor cada vez que fosse necessário aceder ao controlador. O facto de a placa estar localizada de baixo da base de impressão aquecida trazia problemas de refrigeração, pois a base pode ir até à temperatura de 100°C. Sabe-se que os controladores são componentes que necessitam de constante refrigeração e que, no caso do controlador *Atmel Atmega 2560* exceder os 85°C, podem sofrer danos.

Por isso, a melhor solução, de modo a não danificar a nova placa de controlo, é alterar a localização desta e colocar fora da estrutura rígida da impressora. Foi então desenhada uma caixa própria, com as medidas exatas para colocar a placa de controlo, a placa de extensão e a fonte. Este componente foi criado de forma a refrigerar, de forma eficaz, a placa e ser de fácil acesso como é possível verificar pela Figura 47. Os desenhos de definição respetivos à caixa e à sua tampa encontram-se no Anexo C.

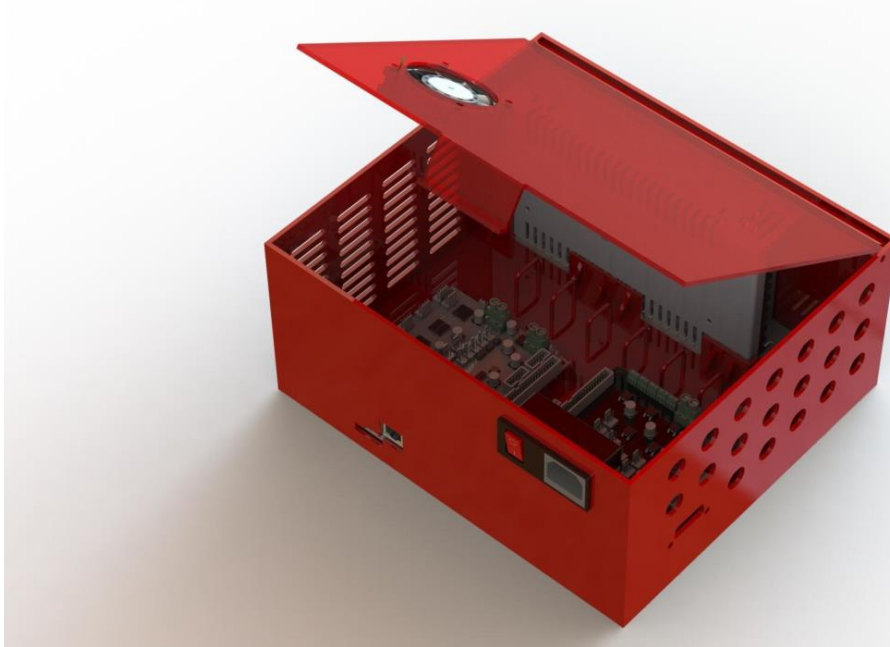


Figura 47 - Caixa projetada para inserção de todos os componentes relativos ao sistema de controlo e à alimentação.

#### *Seleção dos cabos de ligação*

O segundo problema encontrado foi o estado dos fios e as diversas fichas de ligações. Como é possível verificar na Figura 48, existem vários pontos de soldadura em poucos centímetros de fio. De modo a diminuir o ruído, e uma vez que foi ser necessária realizar a extensão de todos os fios, considerou-se a reposição dos mesmos para, desta forma, diminuir os pontos de soldadura ao longo destes.



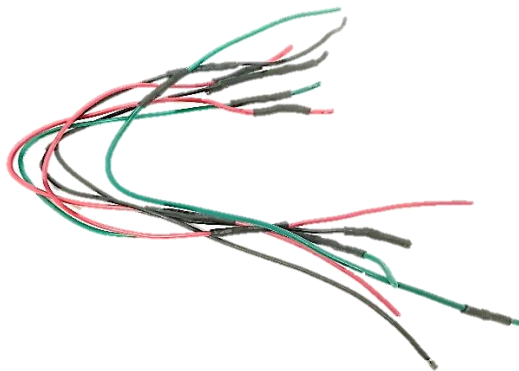


Figura 48 – Fios de ligações com vários pontos de soldadura.

Começou-se por dimensionar os cabos de ligação entre a placa de controlo e os componentes da impressora para que estes suportem a corrente que por eles passa. No Anexo D identifica-se o AWG (*American wire gauge*) para cada corrente requerida. Sendo assim, foram selecionados três grupos de corrente de forma a limitar o número de cabos a dimensionar.

Para o grupo de baixa corrente, que fornece energia aos motores, LEDs, fins de curso, termístores e ecrã, foram definidos os fios AWG 26, diâmetro de 0.40 mm ou superior. Estes cabos suportam uma corrente de 0.37 A, suficiente para estes componentes elétricos.

Para o grupo de corrente média, que fornece energia ao extrusor, foram definidos cabos AWG 17 de diâmetro 1.15 mm ou superior, uma vez que suporta a corrente de 3.2 A.

Para o grupo de alta corrente, que fornece energia à base de impressão aquecida e para as ligações com a fonte de alimentação, foram definidos cabos AWG 10 de diâmetro 2.59 mm uma vez que consegue suportar 15 A.

#### *Seleção de fichas*

Uma vez que se projetou o desenho da caixa pensou-se no facto de se realizarem as ligações facilmente sem haver a necessidade de abrir a mesma. Para isso, utilizaram-se fichas microfone, Figura 49, que são de fácil uso pois possuem uma ranhura que impossibilita ao utilizador de trocar as ligações e, consequentemente, provocar algum curto-circuito na placa.



Figura 49 - Fichas microfone de 4 ligações.

### Blocos de ligação entre perfis

Durante a desmontagem da estrutura da impressora, e para fazer as novas ligações verificou-se que os cantos de ligação entre perfis estavam divididos em duas partes e a forma como estavam projetados dificultavam o aperto e desaperto de toda a estrutura e dos motores de movimentação. Como consequência, foi indispensável algumas alterações de forma a ser apenas um bloco e que considerava as ferramentas de aperto/desaperto daqueles componentes. Para tal fez-se uns rebaixos para instalação dos parafusos (1), realizou-se uma passagem de proteção dos cabos (2), deslocou-se os pontos de aperto da peça ao perfil de modo a ser possível montar e desmontar estes com melhor facilidade (3), realizou-se furos de passagem de ferramenta para alcançar os parafusos de aperto dos motores de movimentação à estrutura (4) e esta peça foi realizada de forma a fazer a ligação dos dois perfis sem precisar de outras formas de união. Estas alterações podem ser visíveis na Figura 50.

O bloco foi impresso com uma impressora do LDPS, *Creality Ender 3*, com uma altura de camada de 0.2 mm, à temperatura de extrusão de 200 °C, temperatura da base de impressão de 70 °C a uma velocidade de 70 mm/s e preenchimento de 25%. O material utilizado foi PLA de cor vermelho pérola, da marca *Filament PM®*, no qual a ficha técnica se encontra no Anexo E. As alterações efetuadas estão corretamente definidas no Anexo F.

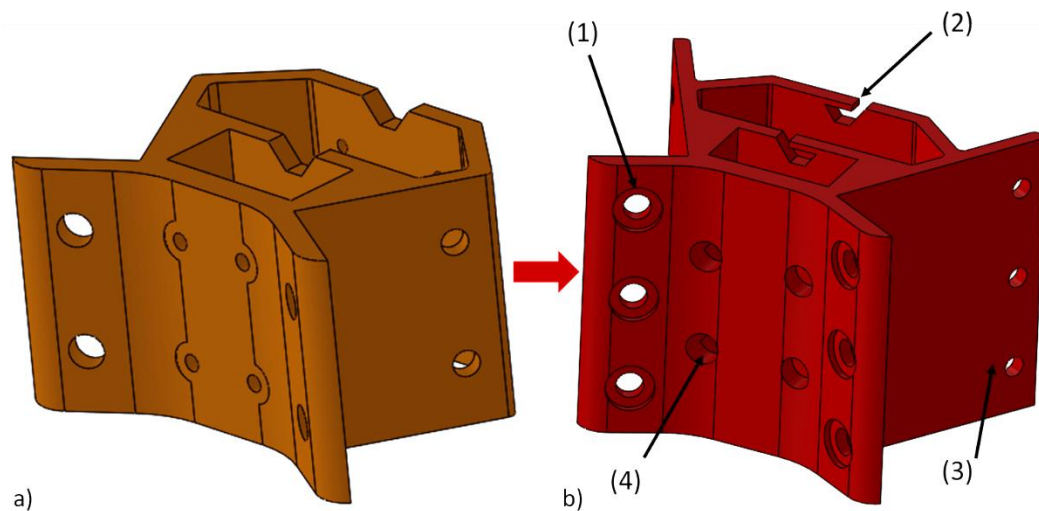


Figura 50 - Bloco de ligação de perfis a) antes da alteração, b) após alteração.

Para além destas alterações, também se imprimiu um sistema de suporte ao ecrã, na impressora *Creality Ender 3*, com os mesmos parâmetros e material utilizados na impressão do bloco, Figura 51. Esse sistema, encontrado na página web, *Thingiverse*, e adaptado para a colocação nos perfis frontais da impressora e para prevenir um melhor ajuste sem escorregamento, como é possível verificar no Anexo G.





Figura 51 - Suporte de ecrã instalado.

#### 4.4 Sistema de controlo

Uma vez observado o módulo, viu-se a necessidade de alteração de controlador com o objetivo de melhorar as propriedades de processamento e a resolução dos *drivers*. Para além disso, tentou-se encontrar controladores que tivessem a possibilidade de incorporar cinco extrusores, com o objetivo da alteração do bico extrusor para um *Diamond Extruder* para uso de cinco filamentos em simultâneo. Teve-se em vista, para realização futura, a possibilidade de isolar a impressora e colocar numa atmosfera controlada. Foram tidos ainda, em consideração todas as características complementares com que a impressora pudesse ser beneficiada.

Teve-se também em consideração o tempo de aquisição de cada uma das placas, ou seja, o facto de estas terem algum representante em Portugal.

Por isso, pretende-se encontrar placas de controlo com as seguintes características:

- Possuir controlador de capacidade de processamento acima de 8bits;
- Placa com pelo menos seis *stepper drivers*, de preferência, incorporados na própria placa;
- A resolução dos *stepper drivers* deverá ser acima de 1/8 *microstepping*;
- Possuir controlo de, pelo menos, cinco motores de extrusão e três motores de movimentação;
- Dispor de módulos de aquecimento para a base de impressão, para o extrusor e para o futuro controlo da câmara aquecida;
- Possibilidade de implementação de várias ventoinhas controladas;
- *Firmware* de código aberto.

Após uma intensa análise aos controladores avaliados no capítulo 3.5, o controlador que mais se enquadra nas características acima apresentadas é a *DUET*, em conjunto com a sua placa de expansão *DUEX5*. O conjunto desta placa de controlo com a placa de expansão associada, admite dez motores com *drivers* incorporados, de alta precisão e sete saídas de aquecimento para extrusores. Tem a possibilidade de cinco ventoinhas na placa principal e mais cinco ventoinhas ou LEDs na placa de expansão. É também capaz de efetuar mistura de cores

e pode ter outras funcionalidades. O *PanelDue* é o LCD *touch* utilizado nas placas *DUET* e tem a particularidade de poder controlar todo o processo podendo intervir através de código G.

Foi então adquirida a placa de controlo *Duet 2 Ethernet*, a placa de expansão *Duex5* e o ecrã *PanelDue*, representados na Figura 52, num dos representantes da marca *DUET*, em Portugal.

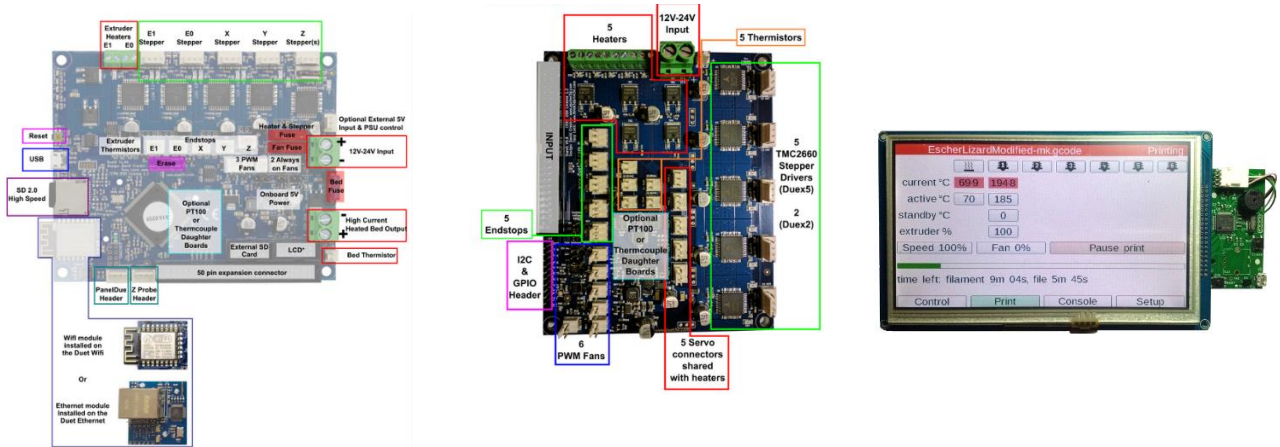


Figura 52 - Placa *Duet 2 Ethernet*, *Duex5* e *PanelDue* (Dozuki 2019).

Como foi referido anteriormente, os cabos elétricos foram projetados para a ligação de cada tipo de componente e, foram soldados segundo uma ordem específica e associada a cada cor, como é possível constatar no esquema da Figura 53.

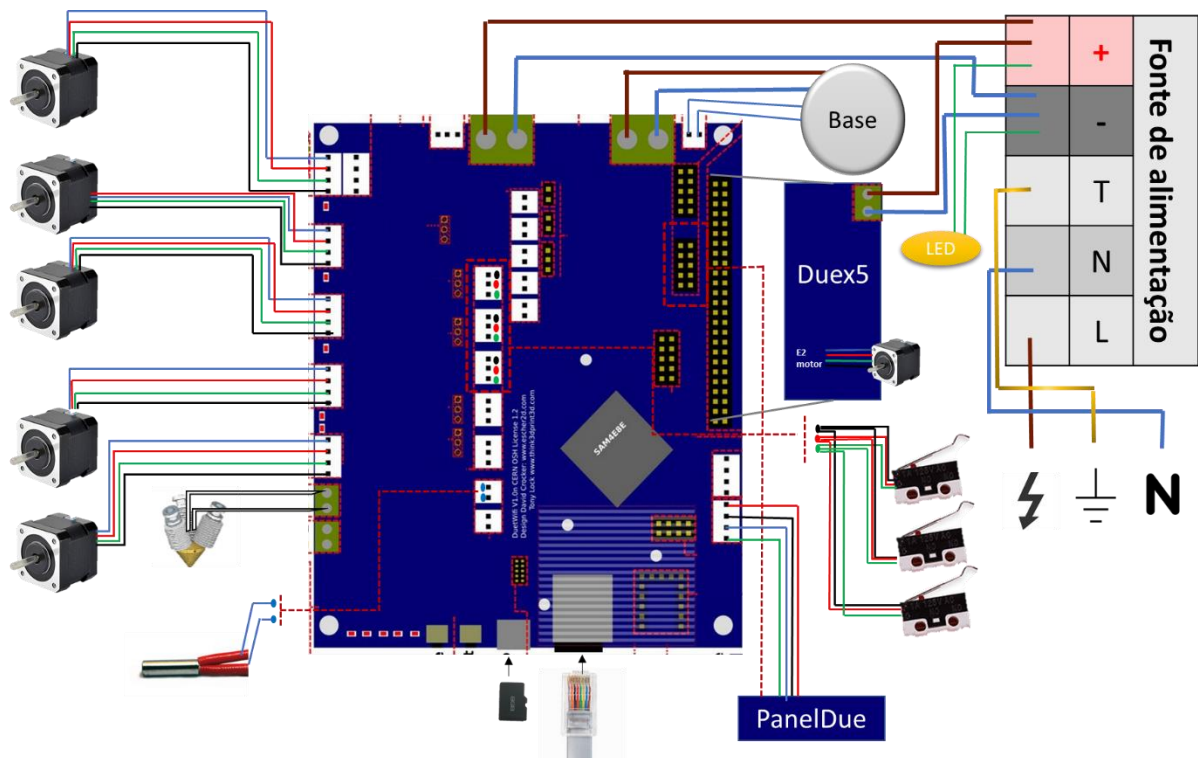


Figura 53 - Esquema de ligações elétricas entre componentes e a placa. Adaptado de (Dozuki 2019).

#### 4.4.1 Configuração do novo *Firmware*

Antes da ligação de todos os componentes à placa, estabeleceu-se a ligação, via USB, da placa para conseguir configurar e atribuir um novo IP – 10.227.132.23. Após esta configuração, foi possível aceder à interface do *firmware* da *Duet*, inserindo o número do IP associado à placa de controlo, na barra de pesquisa de qualquer programa de navegação. Aí abriu-se uma interface criada pela *DUET*, a *Duet Web Control*.

Após a ligação de todos os componentes, e a verificação da continuidade destes com auxílio de um multímetro, foi necessária uma configuração do *firmware* para que seja possível uma identificação, pelo controlador, das propriedades da impressora. Na Figura 54, estão as alterações efetuadas no ficheiro “config.g” da impressora.

```
; Network
M550 P"delta printer" ; Set machine name
M551 P"delta"          ; Set password
M552 P10.227.132.23 S1 ; Enable network and set IP address
M553 P255.255.255.0   ; Set netmask
M554 P10.227.132.254  ; Set gateway
M586 P0 S1            ; Enable HTTP
M586 P1 S0            ; Disable FTP
M586 P2 S0            ; Disable Telnet
```

Figura 54 - Alteração do IP da placa de controlo.

O código G pode ser enviado através da interface *Duet Web Control*, através do USB, utilizando o programa *Pronterface* ou através de um controlador externo como é o caso do ecrã *PanelDue*.

Uma das formas de configurar facilmente a impressora sem necessitar de editar o código G é utilizando o website de configuração, RepRap . Com esta ferramenta de configuração online foi possível a introdução de todos os dados relativos à impressora sem necessidade de interpretar todo o código G. Os dados utilizados para controlar a impressora encontram-se no Anexo H, e, em código G, no ficheiro “config.g” da interface de trabalho da *DUET*.

#### *Configurar as constantes de controlo dos parâmetros de aquecimento*

Numa fase inicial é necessário fornecer ao *firmware* as constantes de controlo PID (Proporcional, Integral e Derivativa) para cada um dos sistemas de aquecimento - a base de impressão aquecida (H0) e o bico extrusor (H1). Este é um parâmetro necessário para aproximar a curva de aquecimento o mais rapidamente possível da temperatura alvo. Uma vez que não se sabe o valor exato, é possível, com a utilização da funcionalidade *auto-tuning*, obter estes valores.

O *auto-tuning* é realizado através do comando M303 H# S##, em que seguido da letra “H” irá estar o sistema de aquecimento que irá ser avaliado e seguido da letra “S” que irá estar à temperatura alvo. Tendo em consideração este comando executou-se:

- M303 H1 S230;  
Realização de *auto-tuning* para o bico extrusor para uma temperatura alvo de 230°C.
- M303 H0 S100;  
Realização de *auto-tuning* para a base de impressão aquecida a uma temperatura alvo de 100°C.

Para verificar os resultados executa-se o comando M307 H#, de acordo com o sistema de aquecimento que se quer verificar. Na Tabela 7 é possível verificar os dados fornecidos pelo *firmware* para o extrusor e para a base de impressão aquecida.

Tabela 7 - Valores de ajuste do PID

|                                  | <i>Extrusor H1</i> | <i>Base aquecida H0</i> |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| <i>A# - Ganho</i>                | 287.20             | 111.70                  |
| <i>C# - Const. de tempo</i>      | 213.70             | 460.90                  |
| <i>D# - Tempo morto</i>          | 7.10               | 0.10                    |
| <i>Max. PWM</i>                  | 1.00               | 1.00                    |
| <i>V# - Tensão de calibração</i> | 12.00              | 12.00                   |

#### *Configuração para alteração de cor*

Uma vez que o *firmware* que é utilizado atualmente, permite a possibilidade de mistura de cores, irá ser aqui explicado como é que se processa à configuração do *firmware* de forma a possibilitar a mistura de cores.

Assim sendo, é necessário compreender que, para se efetuar a mistura de cores, a nova ferramenta criada irá ser apenas virtual e irá ser um rácio de funcionamentos dos três extrusores em simultâneo. Para que isto aconteça é necessário definir a ferramenta introduzindo o código M563 P# D#:#:# H#, em que o P vai ser o novo número da ferramenta, D serão os motores de extrusão a utilizar e H será o sistema de aquecimento utilizado. Com o comando M568 P# S1 ativa-se a ferramenta como ferramenta de mistura de cor. Por fim, é necessário estabelecer o rácio de funcionamento de cada um dos motores de extrusão utilizando o código M567 P# E#:#:#. O somatório de cada um dos rácios terá de dar 1 para não existir falta ou excesso de material. Estas alterações devem ser colocadas e guardadas no ficheiro “config.g” do *firmware*.

A

Figura 55 apresenta o código utilizado para criar a ferramenta 4 como ferramenta de mistura que forma a cor verde a partir de 50% de amarelo e 50% de ciano. Sabe-se que as ferramentas P0, P1 e P2 são ferramentas relativas ao extrusor 1, 2 e 3, que representam a cor ciano, magenta e amarelo, respetivamente.

```
M563 P4 S"mix green" D0:1:2 H1
G10 P4 X0 Y0 Z0
G10 P4 R0 S0
M568 P4 S1
M567 P4 E0.5:0.0:0.5
```

Figura 55 - Código realizado para criar uma ferramenta de mistura formando a cor verde.

#### 4.4.2 Calibração

Depois de todas as alterações anteriormente realizadas, é necessário fazer uma calibração geral de forma a verificar a calibração dos fins de curso, as trajetórias realizadas pela impressora, a movimentação dos extrusores e a movimentação dos eixos.

Para se iniciar a calibração, o controlador necessita de ter percepção espacial do extrusor. Para isso, é indispensável desativar a funcionalidade de limitação geométrica da impressora através do comando M564 S0 H0 que possibilita os movimentos para fora das áreas de impressão. Necessita-se também de reconhecer o ponto mais alto da impressora, para tal obriga-se a que os motores de movimentação se desloquem para um ponto infinitamente longo, por exemplo G1 S1 X800 Y800 Z800, até reconhecer todos os fins de curso. Desta forma, o controlador passa a ter percepção espacial do bico extrusor.

Uma vez que o *firmware* já tem uma percepção espacial do volume de impressão, realizou-se a calibração dos fins de curso seguindo uma metodologia semelhante à realizada no capítulo 3.2. Começando por se calibrar o raio da impressora – *Delta\_Radius* – com um valor inicial de 122 até se obter uma curva de movimentação o mais plana possível. Neste ponto de situação os novos parâmetros foram configurados através do comando M666 R120.8 que altera o valor do *Delta\_Radius*. Calibrou-se os fins de curso até se conseguir obter todos os valores de origem na base da mesa e introduziram-se os novos valores de compensação dos fins de curso por meio do comando M665 X2.1 Y-0.7 Z-1.2.

Uma vez alertados os *microstepping* definidos no antigo controlador, foi de extrema importância registar os novos valores de *steps* por mm para os motores de extrusão. Mais uma vez, seguiu-se o método do capítulo 3.2. Neste caso, uma vez que os motores de extrusão foram complementados com um sistema redutor, foi necessário fazer um cálculo segundo uma proporcionalidade direta do material extrudido sobre o material que é necessário extrudir. Obteve-se assim um valor de 509 *steps* por mm realizado pelo comando M92 E509:509:509.

Visto que todos os parâmetros, essenciais à impressão, foram calibrados, realizou-se a impressão da peça de calibração utilizada na dissertação realizada por Brandão (2018), para calibração do movimento. Observa-se, pela Tabela 8, que é necessário alguns ajustes nos parâmetros geométricos que influenciam a movimentação da impressora, mais concretamente, o comprimento dos braços (*Diagonal rod*). Por isso, procedeu-se a um processo iterativo até conseguir alcançar o valor final teórico, com um erro admissível inferior a 1%.

Tabela 8 - Valores obtidos na primeira peça de calibração

|                      | Distância (mm) |        |        | Ângulo entre torres |               |               |
|----------------------|----------------|--------|--------|---------------------|---------------|---------------|
|                      | XX             | YY     | ZZ     | $\alpha_{XY}$       | $\alpha_{XZ}$ | $\alpha_{ZY}$ |
| <b>Valor teórico</b> | 60             | 60     | 60     | 120                 | 120           | 120           |
| <b>Valor prático</b> | 58.40          | 58.42  | 58.57  | 120                 | 120           | 120           |
| <b>Desvio (%)</b>    | -2.67%         | -2.63% | -2,.8% | 0                   | 0             | 0             |

Através da iteração da terceira peça por intermédio de uma regra de proporcionalidade direta, alterou-se o valor da *diagonal rod* para 251.6. Esta alteração implicou um novo ajuste

do *Delta\_Radius* 118.7. Por meio do comando M666 L251.7 R118.7 conseguiu-se uma geometria da peça da calibração dentro dos valores requeridos, conforme é possível verificar na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores obtidos para a última peça de calibração

|                      | Distância (mm) |        |       | Ângulo entre torres |               |               |
|----------------------|----------------|--------|-------|---------------------|---------------|---------------|
|                      | XX             | YY     | ZZ    | $\alpha_{XY}$       | $\alpha_{XZ}$ | $\alpha_{ZY}$ |
| <b>Valor teórico</b> | 60             | 60     | 60    | 120                 | 120           | 120           |
| <b>Valor prático</b> | 59.96          | 59.95  | 60.01 | 120                 | 120           | 120           |
| <b>Desvio (%)</b>    | -0.07%         | -0.08% | 0.02% | 0                   | 0             | 0             |

Na Figura 56 é possível verificar as três peças necessárias na iteração realizada, até ser possível obter uma dimensão de 60 mm para todas as torres, com um erro de 1%.



Figura 56 - Peças de calibração necessárias para obter os valores finais. Peças de dolpin (2015).

#### 4.5 Parâmetros de impressão

Por fim, dado concluída toda a parte de calibração da máquina, é de elevada importância realizar um estudo dos parâmetros de impressão necessários para se obter uma boa qualidade final. Começou-se por realizar um estudo para identificação do multiplicador de extrusão imprimindo um cubo com dois perímetros com uma largura de deposição de camada de 0.4 mm.

Após várias impressões conseguiu-se um cubo com uma largura de camada muito semelhante ao valor teórico, como representado na Figura 57. Assim, o multiplicador de extrusão a ser utilizado para todas as impressões realizadas irá ser de 0.85.



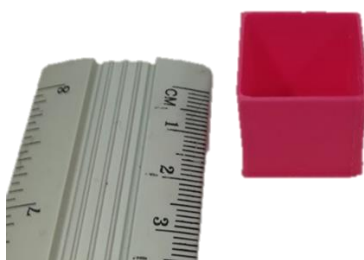


Figura 57 - Cubo de 20 mm para realização de estudo do multiplicado de extrusão.

Seguidamente realizou-se um estudo de parâmetros de retração, como é possível verificar na Figura 58, foram realizadas cinco peças com valores diferentes distâncias de retração e de velocidade de retração.

- (1) distância de retração de 5 mm e velocidade de retração de 40 mm/s
- (2) distância de retração de 7 mm e velocidade de retração de 40 mm/s
- (3) distância de retração de 8 mm e velocidade de retração de 20 mm/s
- (4) distância de retração de 8 mm e velocidade de retração de 40 mm/s
- (5) distância de retração de 8 mm e velocidade de retração de 60 mm/s

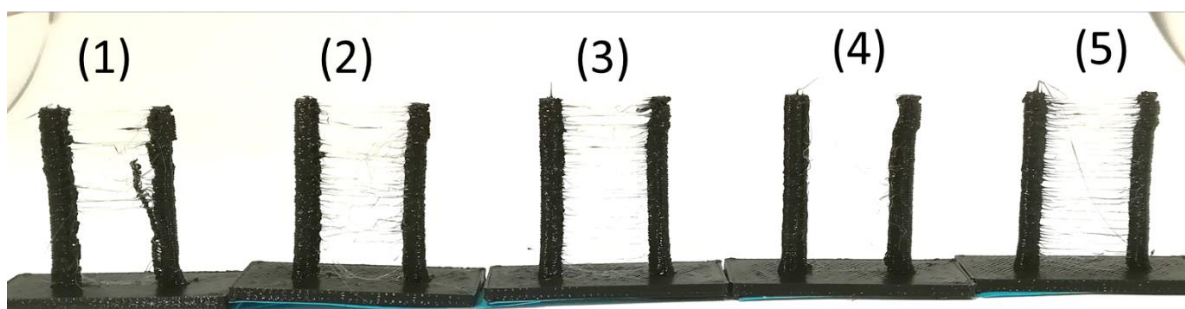


Figura 58 - Estudo de diferentes distâncias e velocidades de retração.

Os valores escolhidos para as peças de parâmetros (1) e (2) estão de acordo com as que foram realizadas no estudo de retração na dissertação de Brandão (2018). A partir daí foram realizadas as peças de parâmetros (3), (4) e (5) de forma a otimizar as velocidades de retração.

Uma vez que os resultados acima não apresentaram a precisão esperada, foram então realizados testes com cubos de calibração XYZ para escolher, de forma mais específica, os parâmetros de impressão.

Fez-se então o teste avaliando a influência de três fatores - a temperatura de extrusão, a velocidade de retração e a distância de retração – com dois níveis cada um, de forma a avaliar qual o conjunto de parâmetros que mais se adequa para uma boa impressão nesta impressora. Foram selecionados valores com grandes intervalos de diferença.

Para a escolha de temperatura a extrudir selecionou-se a temperatura de 190 °C, pois é aquela que proporcionava um melhor acabamento superficial e a temperatura de 210 °C pois é a que, segundo Alafaghani e Qattawi (2018) proporciona melhores propriedades mecânicas.

No que diz respeito à retração, esta não é muito consensual em termos de literatura. Por isso selecionou-se duas distâncias de retração, 4 mm e de 8 mm, e velocidades de retração de 20 mm/s e 70 mm/s.

É importante referir que a distância de retração não deve ser muito elevada pois esta pode provocar o entupimento do canal de entrada do filamento para o bico extrusor, por isso, não foram consideradas distâncias de retração maiores do que 8 mm.

Realizaram-se as amostras a partir de cubos XYZ com os parâmetros na Tabela 10:

Tabela 10 - Definição das amostras

| <i>Nº de amostra</i> | <b>Temperatura de extrusão</b> | <b>Distância de retração</b> | <b>Velocidade de retração</b> |
|----------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| (1)                  | 190 °C                         | 4 mm                         | 20 mm/s                       |
| (2)                  | 190 °C                         | 4 mm                         | 80 mm/s                       |
| (3)                  | 190 °C                         | 8 mm                         | 20 mm/s                       |
| (4)                  | 190 °C                         | 8 mm                         | 80 mm/s                       |
| (5)                  | 210 °C                         | 4 mm                         | 20 mm/s                       |
| (6)                  | 210 °C                         | 4 mm                         | 80 mm/s                       |
| (7)                  | 210 °C                         | 8 mm                         | 20 mm/s                       |
| (8)                  | 210 °C                         | 8 mm                         | 80 mm/s                       |

Por fim, realizou-se um vaso cilíndrico de diâmetro de 180 mm e de altura de 550 mm com altura de camada de 0.3 mm e apenas com um perímetro de espessura, para que este fosse realizado no menor tempo possível.

Realizou-se também algumas peças semelhantes às peças analisadas no capítulo 3.3 de forma a comprovar uma melhoria de impressão verificada com a alteração da placa de controlo. Na Figura 59 é possível observar uma pré-visualização, efetuada através do programa *Slic3r*, das peças a ser realizadas.



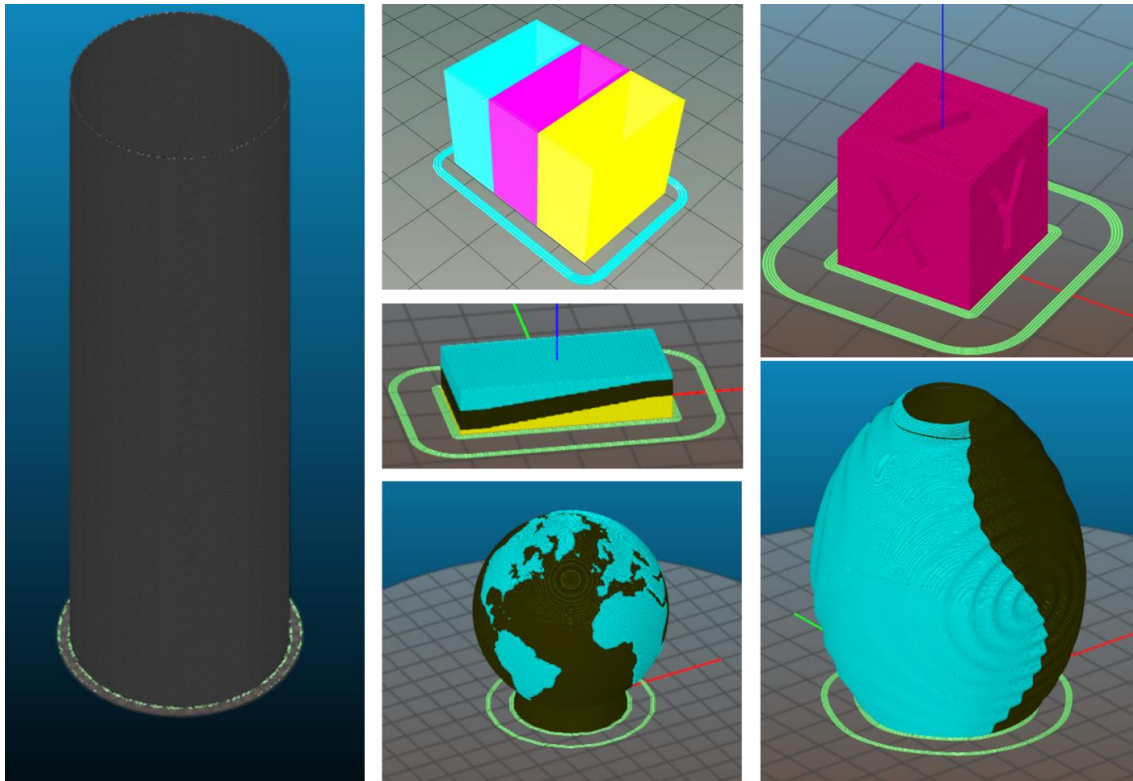


Figura 59 - Peças a realizar com a impressora.

#### 4.6 Módulo da base de impressão

No final das resoluções anteriormente referidas, e uma vez que a mesa se encontrava com desnível, decidiu-se utilizar um vidro de borosilicato, uma vez que este aguenta choque térmico e temperaturas extremas da base de impressão aquecida e do material acabado de depositar. O borosilicato tem um baixo coeficiente de expansão térmica o que provoca menores dilatações do que as observadas anteriormente com a base de alumínio e ajuda a uma melhor calibração. Na Figura 60 é possível visualizar o vidro colocado na base de impressão.

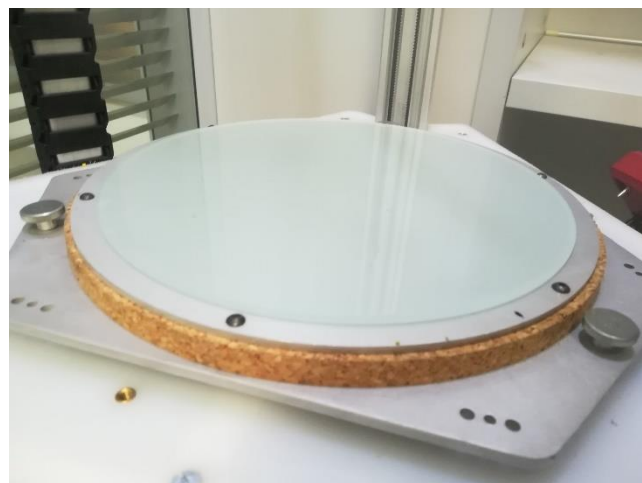


Figura 60 - Base de impressão com vidro de borosilicato.



## 5 Resultados

Uma vez realizadas todas as alterações necessárias para um melhor funcionamento da impressora, realizaram-se várias impressões e vários testes para controlo de parâmetros. Assim, através das peças impressas irão ser comparadas às peças realizadas anteriormente, através do controlador *Arduino*, e serão tiradas conclusões sobre a influência do novo controlador *DUET*.

Iráo ser retidas informações sobre os parâmetros seleccionados e sobre outros problemas encontrados que podem estar relacionados com outros sistemas que não seja o sistema de controlo.

Nota: Utilizou-se outro filamento para além dos referidos no capítulo anterior. Um filamento da marca *Filament PM* de cor preta com as mesmas propriedades de extrusão do que o filamento apresentado. A ficha técnica deste filamento encontra-se no Anexo E.

### 5.1 Comparação das peças realizadas

Com a alteração dos elementos referenciados no capítulo anterior, executou-se algumas peças com o objetivo de avaliar o efeito destes novos componentes. Imprimiu-se então os cubos XYZ nas diferentes cores e a torre de três cores realizada anteriormente.

Pela observação da Figura 61, da Figura 62 e da Figura 63 é possível verificar a melhoria de todos os defeitos geométricos e superficiais. O acabamento de topo está muito mais preenchido e é quase impercetível as linhas de camada. Não existem vazios entre as linhas de deposição, os vértices do cubo são mais retilíneos, a superfície é menos rugosa e as letras estão mais bem formadas.

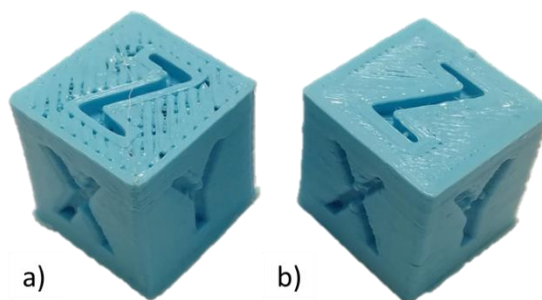


Figura 61 - Comparação do cubo XYZ de cor ciano, a) antes, b) depois. Peças de iDig3Dprinting (2016).

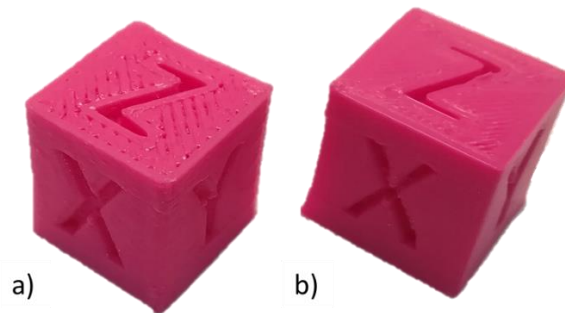


Figura 62 - Comparação do cubo XYZ de cor magenta, a) antes, b) depois. Peças de iDig3Dprinting (2016).

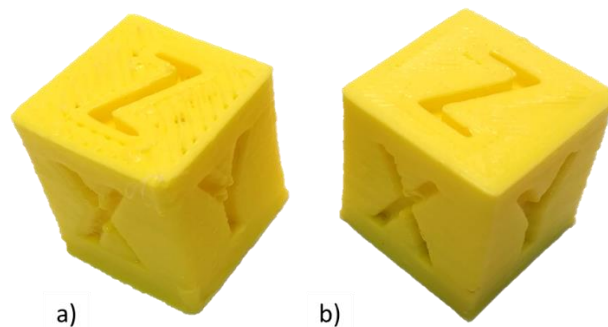


Figura 63 - Comparação do cubo XYZ de cor amarela, a) antes, b) depois. Peças de iDig3Dprinting (2016).

Na Figura 64, foram impressas as torres de três cores em que é notável a grande melhoria do sistema de extrusão. Pois, no caso da parte com a cor ciano, verifica-se uma melhor estruturação, utilizando os mesmos parâmetros de impressão. Confirmou-se mais uma vez que existe melhor qualidade superficial nas faces da torre. No entanto, verificou-se que seria ainda necessária uma melhor parametrização.

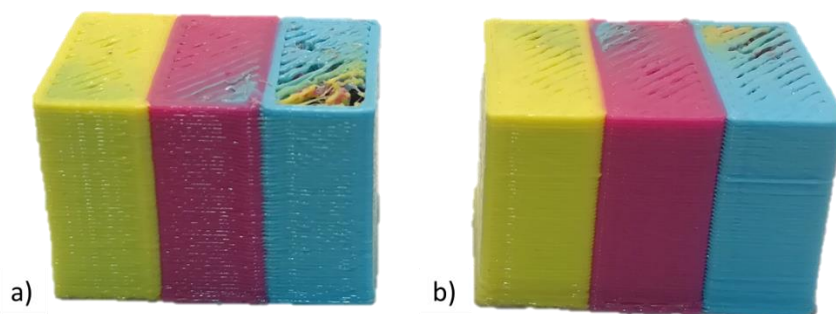


Figura 64 - Comparação de uma torre de purga de três cores, a) antes, b) depois.

Realizou-se, ainda uma peça semelhante à obtida por Regadas (2017), aquando a sua dissertação, e apresentada na Figura 65. Apesar de não serem utilizadas as mesmas cores, a peça mais recente apresenta melhor acabamento de topo e, ainda uma melhor deposição de cor sem que esta se demonstre em outras camadas.

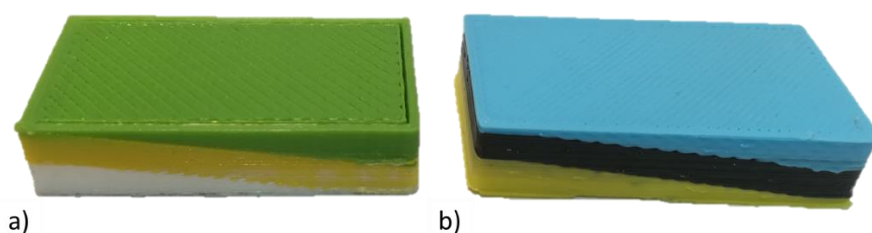


Figura 65 - Comparação de duas peças semelhantes realizadas por, a) Joaquim Regadas, b) Raquel Costa.

## 5.2 Definição dos parâmetros de extrusão adequados

Foram definidos um conjunto de 4 parâmetros que têm em vista uma escolha mais objetiva e selecionada dos parâmetros de impressão. Realizaram-se então oito cubos com diferentes parâmetros com a cor magenta uma vez que a quantidade de filamento amarelo e ciano não permitia a impressão de tantas amostras. Estudou-se então a influência das várias propriedades na qualidade final das peças, pela observação dos cubos representados na Figura 66.

As peças realizadas a 210 °C apresentam, numa primeira seleção, um mau acabamento superficial de topo, na face da letra Z, à exceção da peça número 8, sendo a peça número 4 é a que apresenta melhor qualidade nessa face.

No que diz respeito aos vértices dos cubos, as peças realizadas a 190 °C apresentam uma mudança de camada mais linear, enquanto que as peças realizadas a 210 °C apresentam um vértice mais irregular.

Para as faces das letras X e Y, para valores de retração e velocidade mais altos, identificam-se menos defeitos e menos resíduo de filamentos provocados pela falta de retração.

Assim sendo, para as características apresentadas acima, a peça que apresentou melhor qualidade superficial foi a peça realizada a 190 °C, 8 mm de distância de retração e 70 mm/s de velocidade de retração. Realizou-se também peças com os mesmos valores para um cubo semelhante a amarelo e a ciano e estes apresentaram as mesmas características. Por isso, estes valores irão ser utilizados nas impressões que se seguem.

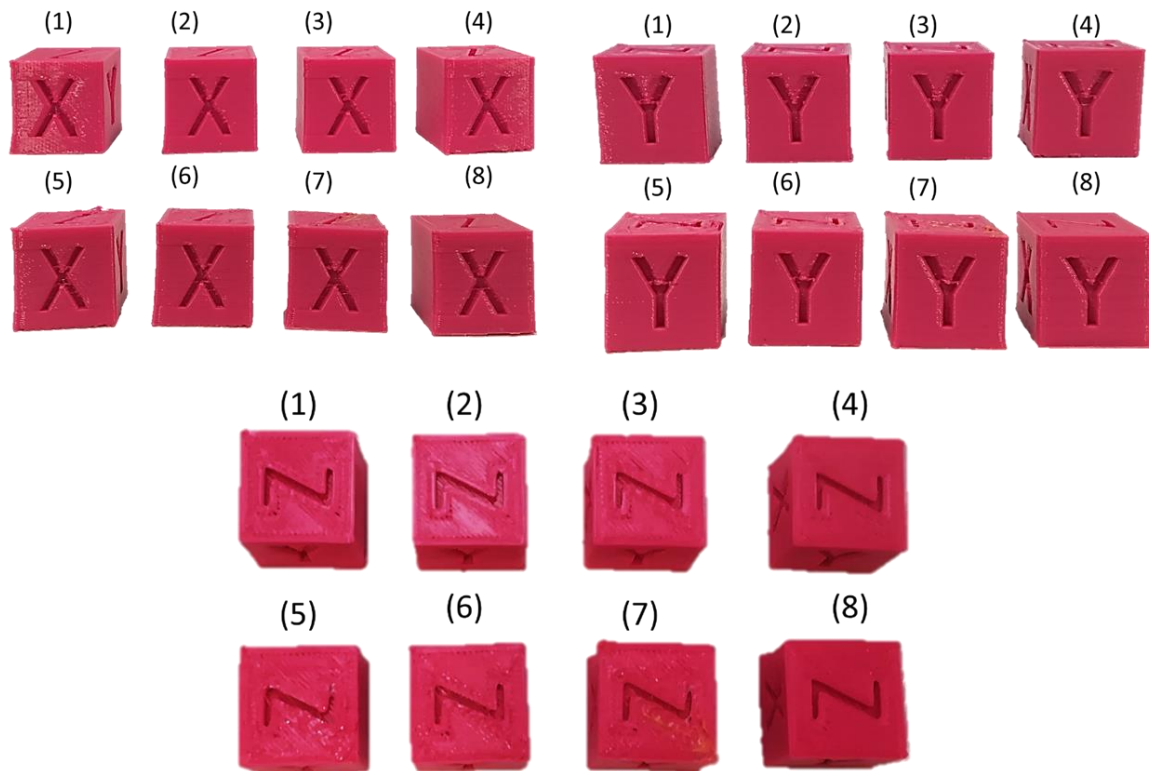


Figura 66 – Várias perspectivas das amostras de avaliação de parâmetros. Peças de iDig3Dprinting (2016).

### 5.3 Análise da peça impressa com o volume de impressão

Como forma de comprovar a calibração de estrutura, e a implementação do novo sistema de controlo e do sistema de extrusão foi realizada uma peça que englobasse grande parte do volume de impressão.

Foi então realizado um vaso cilíndrico, de diâmetro de 180 mm e de altura de 550 mm, Figura 67. A partir deste vaso foi possível tirar várias conclusões bem como indicar alguns problemas encontrados. Assim, e de forma a aumentar o tempo de realização deste objeto, utilizou-se uma altura de camada de 0.32 mm, construção de apenas um perímetro, velocidades de construção de 30 mm/s, temperatura de 200 °C. Utilizou-se também o modo de impressão “vase mode”, uma vez que, neste modo, teoricamente, não existe paragem nem retração do filamento, depositando o filamento em forma de espiral.

Durante a impressão a temperatura da sala era controlada por um sistema de ar condicionado que inicialmente estava a 22 °C, com uma variação de  $\pm 3$  °C durante a produção de toda a peça.





Figura 67 - Vaso cilíndrico de dimensões  $\varnothing 180 \times 550mm$ .

Na Figura 68 é possível averiguar alguns problemas de deposição de camadas. Inicialmente pensou-se que o fluxo de ar frio proveniente do ar condicionado influenciou as falhas referenciadas, no entanto, não descartando essa hipótese verificou-se que estas falhas de deposição poderiam estar relacionadas com a linha de costura formada. É possível observar na Figura 68 c) que antes do extrusor fazer retração e antes da dita “linha de costura”, a superfície apresenta-se sem defeitos e com boa qualidade superficial. Porém, após a linha de costura verificam-se alguns defeitos provocados pela falta de adesão do filamento à camada inferior.

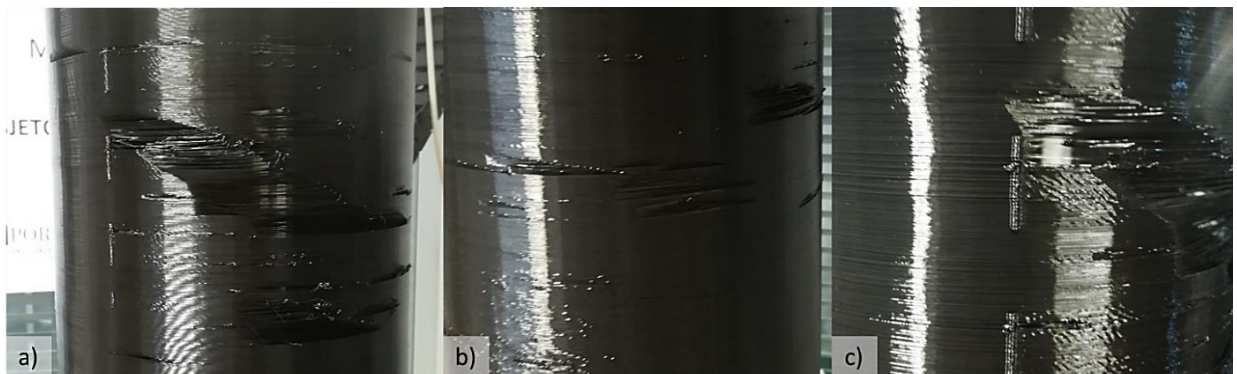


Figura 68 - Problemas encontrados na realização do vaso cilíndrico.

#### 5.4 Objetos impressos multicolor

De forma a comprovar o bom funcionamento da utilização simultânea de várias cores foram realizadas algumas peças com objetivo estético ou lúdico. No entanto, estas apresentam alguns aspetos a ser melhorados.

Realizou-se um vaso, representado na Figura 69, que apresenta uma boa mudança de cor e é uma peça de 90 mm de altura, sem nenhum erro de controlo associado. O acabamento superficial apresenta alguma rugosidade uma vez que não foi implementado um sistema de ventoinha de arrefecimento do filamento à saída do bico extrusor. É de salientar que o comportamento do filamento preto foi melhor do que o filamento ciano, uma vez que este era um filamento novo e com poucas contaminações.



Figura 69 - Vaso de duas cores.

Decidiu-se realizar outra peça de duas cores com a existência de mais pormenores com o objetivo de comprovar a melhor impressão e de salientar os problemas referidos anteriormente. Posto isso, escolheu-se um globo com duas cores. Este apresenta alguns defeitos superficiais que seriam resolvidos caso existisse uma ventoinha de arrefecimento à saída do filamento e, ainda, no topo do globo é visível um excesso de material causado pelo sistema de retração. Contudo, o resultado final foi de acordo com o esperado, Figura 70.



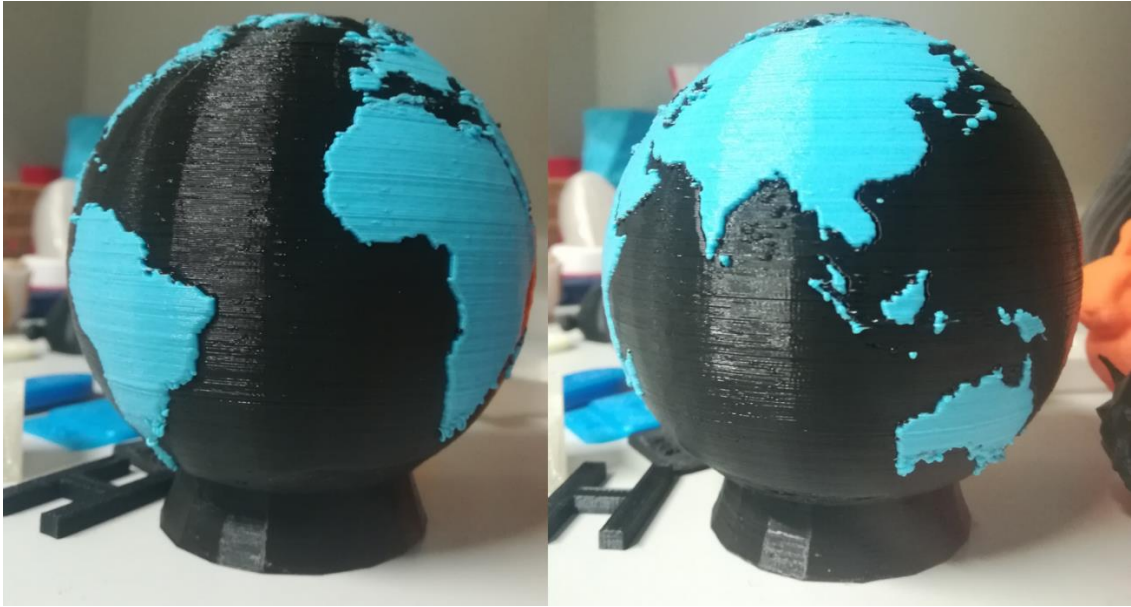


Figura 70 - Globo de duas cores (m6mafia 2011).

### 5.5 Mistura de cor

Na fase final, foi possível produzir duas amostras com mistura de cores, das quais uma foi efetuada com temperatura de 190 °C e a outra com uma temperatura de 210 °C para identificar se a temperatura influencia numa melhor mistura de cor. Realizou-se assim uma peça com três camadas, das quais a primeira camada, junto à base, tem apenas a cor amarela, a segunda camada tem na sua constituição 75 % de amarelo e 25 % de ciano e a terceira camada tem 50 % de amarelo e 50 % de ciano. As torres realizadas são cilíndricas, de 20 mm de diâmetro e 15 mm de altura.

Com a análise da Figura 71 é possível verificar que existem zonas da peça em que se efetua melhor a mistura de cor do que outras, isto pode ser explicado pelo facto do bico extrusor ter uma câmara de mistura com um volume demasiado pequeno para a mistura se efetuar de forma a obter-se uma cor de boa qualidade, criando assim um efeito “pasta de dentes”. Segundo membros de blogues de impressão 3D, que realizam mistura de cores com este tipo de bico extrusor, a mistura de cores é mais eficiente quando se utiliza filamento translúcido. Existem poucas diferenças entre a peça realizada a 190 °C e a peça realizada a 210 °C, no entanto, estas peças realizadas não foram suficientes para tirar qualquer tipo de conclusões.

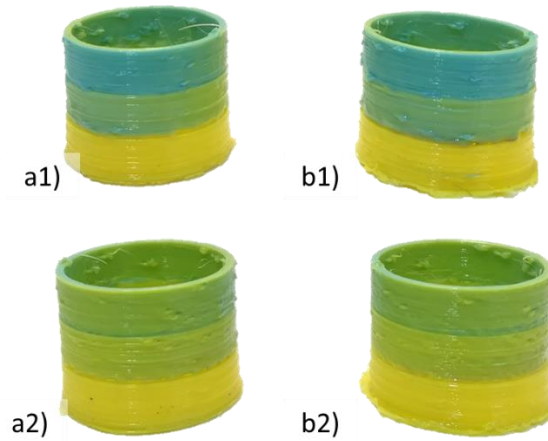


Figura 71 - Torre de mistura de cor a1) parte de trás a 190 °C, a2) parte de trás a 210°C, b1) parte da frente a 190 °C, b2) parte da frente a 210 °C.

### 5.6 Estado final da Impressora

Por fim, a impressora adquiriu um novo sistema de controlo da DUET, e um sistema adicional aos motores de extrusão que eliminaram os problemas de escorregamento na extrusão do material e a partir dos quais foi possível criar peças representados na Figura 72.



Figura 72 - Imagem resumo do trabalho realizado.

## 6 Conclusões

A utilização de processos de fabrico aditivo é, cada vez mais, alvo de um forte estudo e investigação, sendo atualmente considerado um processo de produção de produtos finais. Desta forma, salienta-se a importância do estudo e desenvolvimento desta nova tecnologia.

As impressoras Delta distinguem-se das restantes pelo facto de produzirem peças mais económicas e de forma mais ágil, quando comparadas a impressoras convencionais. Estas apresentam uma cinemática de movimentação paralela, conhecida por permitir maiores velocidades de movimentação e por conseguirem conceber produtos com dimensões superiores, principalmente segundo a direção z.

O trabalho realizado nesta dissertação consistiu na alteração e atualização da impressora 3D tipo Delta do Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços, desenvolvida e otimizada anteriormente.

Foram estudados todos os módulos da impressora de modo a detetar possíveis fontes de erros que impossibilitavam o término da criação de peças de grandes dimensões. Assim, realizaram-se algumas alterações com o objetivo de melhoria de alguns sistemas, de forma a ser possível demonstrar que esta impressora é capaz de imprimir peças em todo o seu volume de construção, sem qualquer tipo de interrupção.

Alterou-se o mecanismo de extrusão colocando um sistema capaz de aumentar o binário, binário este que é essencial para melhorar a extrusão realizada pelo motor. Após esta alteração, foi corrigido o problema de escorregamento do filamento e de falta de binário, conseguindo, assim, produzir peças de grandes dimensões até ficarem completamente concluídas.

O sistema de controlo foi substituído por uma placa de maior capacidade de processamento e com *stepper drivers* integrados de melhor resolução. Com esta atualização verificou-se uma movimentação mais precisa, tornando assim a calibração do sistema mais consistente e fácil. As peças realizadas ao longo do trabalho apresentaram uma melhor qualidade superficial, com especial relevância na impressão de peças complexas.

Decidiu-se colocar o sistema de controlo e a fonte de alimentação fora da impressora, para que este não estivesse sujeito a temperaturas elevadas, que provocavam desalinhamentos ou outro tipo de problemas de controlo induzidos pelo sobreaquecimento da placa e, ainda, para melhorar o acesso a todo o sistema de controlo eletrónico.

Os parâmetros relativos à impressora Delta foram calibrados, contudo, estes não foram suficientes para a eliminação completa de defeitos superficiais. De forma a conseguir melhorar a impressão, seria necessário implementar um sistema de arrefecimento do filamento à saída do bico extrusor e, ainda, estudar a melhor forma de reduzir ao máximo o comprimento dos tubos de *Bowden*, causadores de atrito e de vários problemas de retração.

Com a alteração do *firmware* simplificou-se a configuração necessária para a realização de mistura de cor. Assim, foi possível realizar um teste de mistura de cor, sendo que, irá ser ainda necessário um estudo intensivo relativo a este processo no *Diamond Hotend*.

Concluindo, esta dissertação permitiu resolver os problemas inicialmente identificados, recorrendo ao processo de engenharia reversa, ou seja, a partir da observação do objeto final produzido por FDM, ou da visualização do funcionamento da impressora, conseguir identificar a causa dos defeitos encontrados.

## 7 Trabalhos Futuros

Uma vez terminadas as principais atualizações da impressora Delta, existem ainda atividades que seria interessante levar a cabo, de forma a dar solução a vários problemas identificados e, para que se compreendam certos comportamentos da impressora.

Foram encontrados problemas de qualidade superficial das peças e de retração do filamento. Para a resolução dos mesmos, será imprescindível realizar um estudo capaz de resolver os defeitos de impressão e, especialmente, o efeito de atrito causado pelo comprimento dos tubos de *Bowden* na realização da retração, para o tipo de bico extrusor utilizado.

Uma vez que o *Diamond Hotend* tem uma geometria complexa seria interessante perceber como se dá o escoamento do fluído dentro deste e qual o volume de material suportado pela câmara de mistura, de forma a ser possível realizar a mistura eficaz de cor, com o menor desperdício de material e a criação do efeito “pasta de dentes”.

Uma vez que a placa adquirida dá a oportunidade de implementação de sistemas complementares, seria importante prever e implementar o novo extrusor *Diamond Hotend* com entrada de cinco filamentos em simultâneo. Esta placa permite também a implementação de um sistema de atmosfera controlada, em que seria necessário formar uma câmara fechada em volta do volume de impressão, para assim realizar peças de grandes dimensões e multicolor.

Na observação da extrusão do material e na verificação da qualidade superficial das peças constata-se que o material não consegue solidificar totalmente, o que provoca, defeitos visuais nas peças. Desta forma, seria fundamental a implementação de uma ventoinha que transmita o fluxo de ar através de um canal, arrefecendo o material à saída do bico de extrusão, sem provocar alterações significativas da temperatura no interior do bico extrusor. Caso o fluxo de ar seja de tal forma intenso ao ponto de provocar o arrefecimento do bico extrusor, podia dar-se o entupimento deste por diminuição precoce da temperatura do filamento.



## Referências

- 3DAddicted. 2018a. "32 Bit 3D Printer Board Comparison Chart". Acedido a Abril 2019. <https://3daddict.com/32-bit-3d-printer-board-comparison/>.
- . 2018b. "MKS SBASE V1.3 32bit 3D Printer MainBoard Controller". Acedido a Abril 2019. <https://3daddict.com/mks-sbase-32bit-mainboard-controller/>.
- A. Brandão, Jorge Lino Alves e Santiago Castellanos Villa. 2018. "Colour combination effect on the flexural strength of PLA components produced with a single nozzle multi-material 3D printer". Comunicação apresentada em PMI 2018 – 8th Bi-Annual International Conference on Polymers and Moulds Innovations, em University of Minho, Guimarães, Portugal. 19 to 21 of September 2018.
- Abreu, Tiago. 2017. "Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo Delta", dissertação de mestrado FEUP/DEMec, FEUP.
- Alafaghani, AlaB—aldin e Ala Qattawi. 2018. "Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method". *Journal of Manufacturing Processes* no. 36:164-174. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612518314026>.
- Ana Pilar Valerga, Moisés Batista e Jorge Salguero and Frank Girot. 2018. Influence of PLA Filament Conditions on Characteristics of FDM Parts.
- AS, Intelligent Agent. 2017. "Replicape Rev B". Acedido a Abril 2019. <https://replicape.github.io/index.html>.
- Beaudoin, Alex, Robert Boulanger e Jessica DiPersio. 2017. *Multihead 3D Printer*. Worcester Polytechnic Institute.
- Bell, Charles. 2015. *3D Printing with Delta Printers*. Apress.
- Bellini, Anna, Selçuk Güçeri e Maurizio Bertoldi. 2004. "Liquefier Dynamics in Fused Deposition". *Journal of Manufacturing Science and Engineering* no. 126 (2):237-246. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1688377>.
- Brandão, André. 2018. "Impressora FDM tipo Delta: estudo de impressão de cor e comparação de propriedades", dissertação de mestrado FEUP/DEMec.
- Cicala, Gianluca, Davide Giordano, Claudio Tosto, Giovanni Filippone, Antonino Recca e Ignazio Blanco. 2018. *Poly(lactide (PLA) Filaments a Biobased Solution for Additive Manufacturing: Correlating Rheology and Thermomechanical Properties with Printing Quality*. Vol. 11.
- David\_Mussaffi. 2016. "Starelt Vase (Dual Extrusion / 2 Color)". Acedido a Abril 2019. <https://www.thingiverse.com/thing:1740744>.
- Devices, Panucatt. 2019. "Azteeg X3 PRO 3D printer Controller". [https://www.panucatt.com/Azteeg\\_X3\\_Pro\\_p/ax3pro.htm](https://www.panucatt.com/Azteeg_X3_Pro_p/ax3pro.htm).

- dolpin. 2015. "Advanced Delta Printer Calibration (tower position + individual diagonal rod)". Acedido a Março 2019. <https://www.thingiverse.com/thing:745523>.
- Dozuki. 2019. "Duet3D Documentation". Acedido a Junho 2019. <https://duet3d.dozuki.com/>.
- Duet3D. 2019. "Duet 2 Ethernet". <https://www.duet3d.com/DuetEthernet>.
- Filament2Print. 2016. "Secador de filamento PrintDry". Acedido a Junho 2019. <https://filament2print.com/pt/manutencao-outros/944-printdry.html>.
- . 2018. "Dúvidas habituais sobre a temperatura e a velocidade de impressão do PLA e ABS". Acedido a Abril 2019. [https://filament2print.com/pt/blog/9\\_duvidas-temperatura-velocidade-pla-abs.html](https://filament2print.com/pt/blog/9_duvidas-temperatura-velocidade-pla-abs.html).
- González, Sergio Gómez. 2016. *Impresión 3D*. MARCOMBO, S.A.
- iDig3Dprinting. 2016. "XYZ 20mm Calibration Cube". Acedido a Março 2019. <https://www.thingiverse.com/thing:1278865>.
- Jennings, Alastair. 2019. "Got 3D printing issues? Check out our 2019 3D printing troubleshooting guide to 41 common FDM & SLA 3D printing problems and their solutions.". <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>.
- João Abreu, Santiago Castellanos e Jorge Lino Alves. 2017. "Desenvolvimento de uma impressora 3D do Tipo Delta". *Tecnometal* no. vol. 229:pp. 8-19.
- Leonardo Santana, Carlos Ahrens, Aurélio Netto, Guilherme Oliveria e Cláudia Merlini. 2016. "Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de PLA para impressoras 3D de código aberto". *CONEM 2016*.
- LERDGE. 2018. "Lerdge-K Motherboard Basic Wiring Instructions". Acedido a Abril 2019. [http://www.lerdge.com/case\\_view.aspx?TypeId=30&Id=403&FId=t4:30:4](http://www.lerdge.com/case_view.aspx?TypeId=30&Id=403&FId=t4:30:4).
- m6mafia. 2011. "Two Color World". Acedido a Junho 2019. <https://www.thingiverse.com/thing:11660>.
- N. Turner, Brian, Robert Strong e Scott A. Gold. 2014. "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling". *Rapid Prototyping Journal* no. 20 (3):192-204. <https://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.
- Obudho, Brian. 2018. "3D Printer Glass Bed – What to Consider & Which to Buy". Acedido a Junho 2016. <https://all3dp.com/2/3d-printer-glass-bed-what-to-consider-which-to-buy/>.
- Regadas, Joaquim. 2017. "Otimização de uma impressora 3D Delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores", dissertação de mestrado FEUP/DEMec.
- Relvas, Carlos. 2018. *O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital*. Engebook ed.
- RepRap. "RepRapFirmware Configuration Tool". <https://configurator.reprapfirmware.org/Start>.
- RepRap.org. 2018. "Diamond Hotend". Acedido a Junho 2019. [https://reprap.org/wiki/Diamond\\_Hotend](https://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend)
- . 2019a. "RADDs". Acedido a Junho 2019. <https://reprap.org/wiki/Radds>.
- . 2019b. "RAMBo". Acedido a Junho 2019. <https://reprap.org/wiki/Rambo>.
- . 2019c. "RAMPS 1.4". Acedido a Junho 2019. [https://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4).
- Roberto Spina,



- Bruno Cavalcante, and Fulvio Lavecchia. 2018. Characterization of PLA parts made with AM process.
- Rohringer, Sean. 2019. "3D Printer Filament Guide – All You Need to Know in 2019". <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>.
- Santana, Leonardo, Jorge Lino Alves, Aurélio da Costa Sabino Netto e Claudia Merlini. 2018. "Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica". *Matéria (Rio de Janeiro)* no. 23. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762018000400457&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762018000400457&nrm=iso).
- Simplify3D. 2019. "Print Quality Troubleshooting Guide". Acedido a Abril 2019. <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>.
- Smoothieware.org. 2019. "Smoothieboards". Acedido a Junho 2019. <http://smoothieware.org/smoothieboard>.
- Soares, Juliana Breda, João Finamor, Fabio Pinto Silva, Liane Roldo e Luis Henrique Cufí. 2018. "Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing". *Rapid Prototyping Journal* no. 24 (8):1305-1316. Acedido a 2019/06/05. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2017-0177>.
- Staicu, Stefan e Daniela-Craita Carp-Ciocardia. 2003. "Dynamic Analysis of Clavel's Delta Parallel Robot ". no. 3.
- Technologies, BCN3D. 2019. "The anatomy of an Extrusion System".
- UltiMachine. 2017. "Archim 1.0". Acedido a Abril 2019. <https://ultimachine.com/products/archim-1-0a>.
- VanessaE. 2016. "Greg's B'Wadestruder - geared B'struder - bowden extruder for MK7 / MK8 and similar gears - v2". <https://www.thingiverse.com/thing:1831961>.
- virtox. 2012. "Julia Vase #002 - Yin Yang". Acedido a Abril 2019. <https://www.thingiverse.com/thing:28202>.
- Volpato, N. 2017. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher.
- Wittbrodt, Ben e Joshua M. Pearce. 2015. "The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components". *Additive Manufacturing* no. 8:110-116. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000494>.
- Wohlers, Terry T. Campbell, Ian Diegel, Olaf Huff, Ray Kowen, Joseph. 2019. *Wohlers report 2019 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins, Col.



## ANEXO A: Ficha técnica do filamento utilizado



# PLA Filament 1.75 mm



**i** PLA (Polylactic acid) is the best material for getting started with your 3D printer, as it:

- Hardens quickly
- Has minimal thermal tension
- Has minimal deformation
- Does not require Kapton tape
- Does not require heated bed
- Acetone-resistant

BQ PLA filament is made from 100% PLA.  
PLA is a biodegradable product obtained from plant-derived sugars.

**⚙️** Flexural elastic modulus: 3600 MPa (ISO 178)  
Flexural strength: 108 MPa (ISO 178)  
Hardness: 85 Sh D (ASTM D2240)

|  | Injection-moulded test pieces | Printed test pieces <sup>1</sup> | Printed test pieces <sup>2</sup> |
|--|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Tensile strength at break <sup>3</sup>   | 52 MPa                        | 50 MPa                           | 39 MPa                           |
| Tensile elongation at break <sup>3</sup> | 5%                            | 9%                               | 4%                               |
| Tensile modulus <sup>3</sup>             | 1320 MPa                      | 1230 MPa                         | 1120 MPa                         |

<sup>1</sup> Stretched parallel to layers.  
<sup>2</sup> Stretched perpendicular to layers.  
<sup>3</sup> ISO 527

**⚖️** Filament Diameter: 1.75 mm  
Thickness: 1.24 g/cm<sup>3</sup> (ASTM D792)  
Weight: 1 kg  
Spool Size: 195 mm x 73 mm

**🔥** Recommended printing temperature: 200/220 °C  
Heat distortion temperature: 56 °C (ISO 75/2B)  
Melting temperature: 145/160 °C (ASTM D3418)  
Glass Transition Temperature: 56/64 °C (ASTM D3418)

**✓** Compatible with: any printer that uses 1.75 mm filament

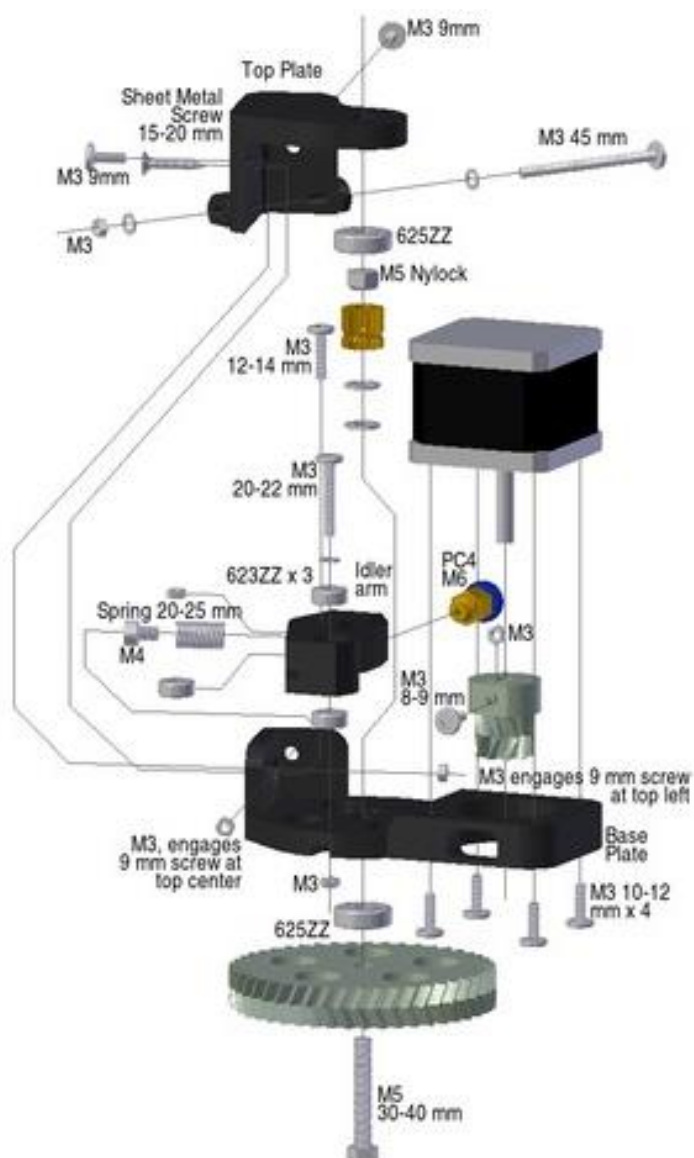
|   |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
| SKU: F000097<br><br>Coral              | SKU: F000098<br><br>Turquoise          | SKU: F000099<br><br>Violet         | SKU: F000100<br><br>Sulphur yellow  | SKU: F000101<br><br>Topaz blue    |
| SKU: 05BQFIL023<br><br>Aubergine       | SKU: 05BQFIL024<br><br>Magenta         | SKU: 05BQFIL025<br><br>Sky blue    | SKU: 05BQFIL026<br><br>Coal black   | SKU: 05BQFIL027<br><br>Pure white |
| SKU: 05BQFIL028<br><br>Vitamine orange | SKU: 05BQFIL029<br><br>Ruby red        | SKU: 05BQFIL030<br><br>Grass green | SKU: 05BQFIL031<br><br>Bottle green | SKU: 05BQFIL032<br><br>Ash grey   |
| SKU: 05BQFIL033<br><br>Transparent     | SKU: 05BQFIL034<br><br>Sunshine yellow |   |  |   |



77



## ANEXO B: Montagem do sistema de extrusão



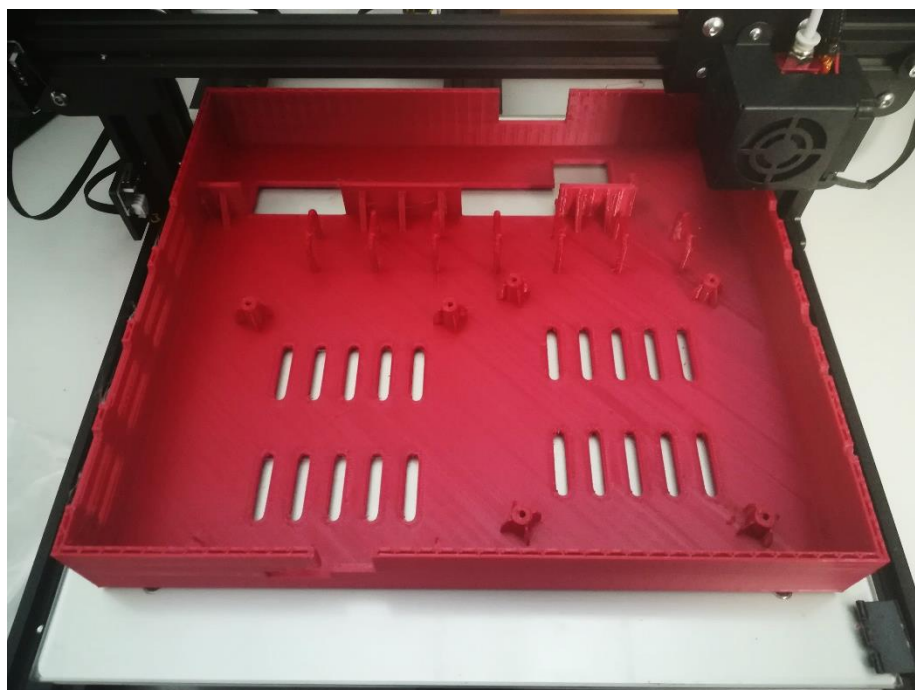
#### Lista de peças

- 2 uni. rolamentos 625ZZ
- 3 uni. rolamentos 623ZZ
- 1 uni. parafusos M5x35
- 2 uni. porcas baixas M5
- 1 Polia dentada tipo MK7 ou MK8
- 1 Encaixe de *Bowden* PC4-M6
- 1 uni. de parafusos M4x10
- 1 mola de 20 mm
- 4 uni. parafusos M3x10
- 5 uni. parafusos M3x12
- 1 uni. parafusos M3x45
- 1 uni. parafusos M3x20
- 5 uni. porcas M3
- 3 uni. anilhas M3
- 2 uni. anilhas M5

Retirado de <https://www.thingiverse.com/thing:1831961>

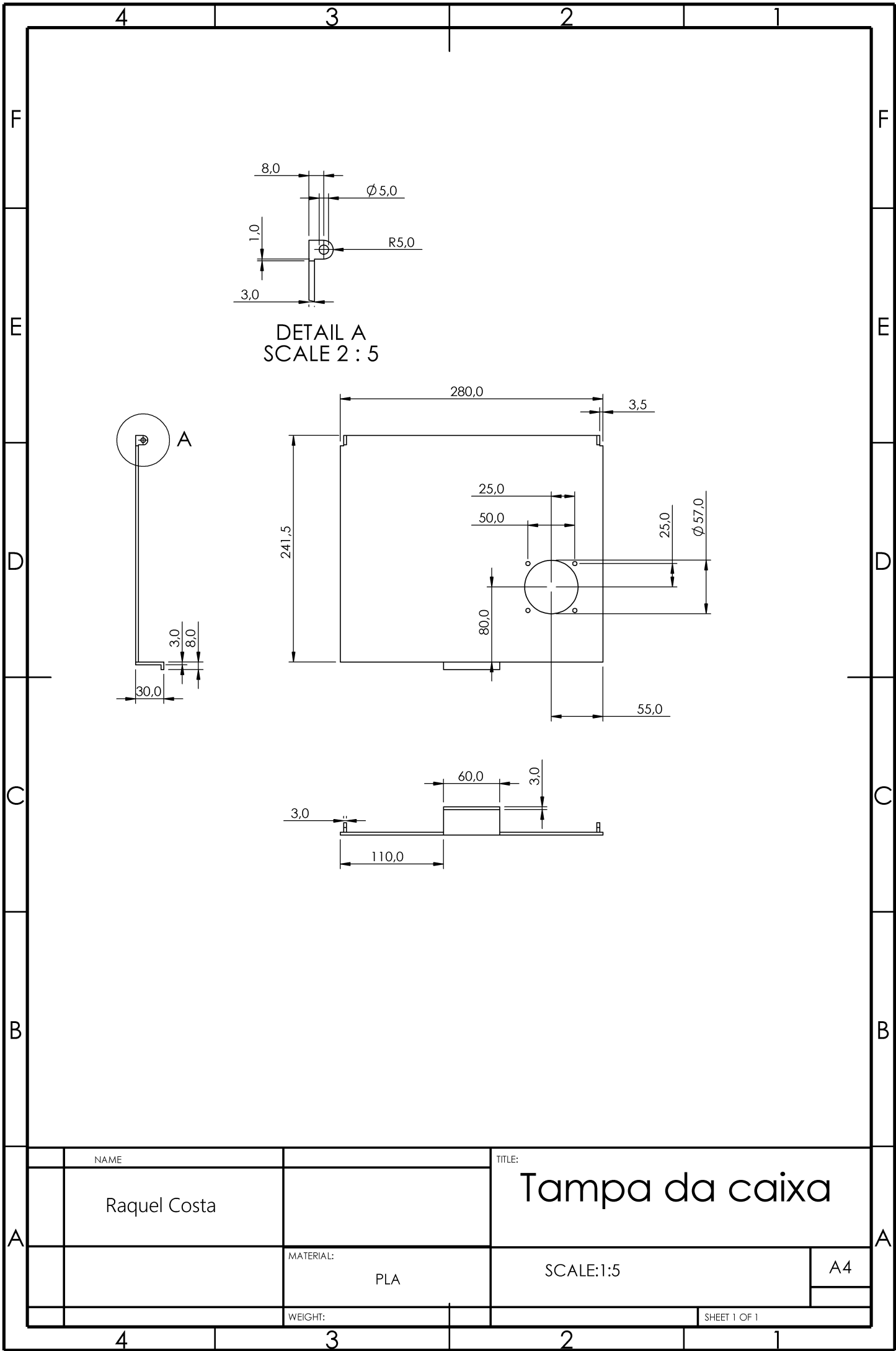
## ANEXO C: Caixa de armazenamento dos componentes

Realização da caixa para instalação do sistema de controlo e do sistema de alimentação



SHEET 1 OF 1







## ANEXO D: Ficha AWG

**Tabela de fios AWG**

Esta tabela informa as características das diversas bitolas A.W.G.

| Número AWG | Diâmetro (mm) | Secção (mm <sup>2</sup> ) | Número de espiras por cm | Kg por Km | Resistência (ohms/Km) | Capacidade (A) |
|------------|---------------|---------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| 0000       | 11,86         | 107,2                     |                          |           | 0,158                 | 319            |
| 000        | 10,40         | 85,3                      |                          |           | 0,197                 | 240            |
| 00         | 9,226         | 67,43                     |                          |           | 0,252                 | 190            |
| 0          | 8,252         | 53,48                     |                          |           | 0,317                 | 150            |
| 1          | 7,348         | 42,41                     |                          | 375       | 1,40                  | 120            |
| 2          | 6,544         | 33,63                     |                          | 295       | 1,50                  | 96             |
| 3          | 5,827         | 26,67                     |                          | 237       | 1,63                  | 78             |
| 4          | 5,189         | 21,15                     |                          | 188       | 0,80                  | 60             |
| 5          | 4,621         | 16,77                     |                          | 149       | 1,01                  | 48             |
| 6          | 4,115         | 13,30                     |                          | 118       | 1,27                  | 38             |
| 7          | 3,665         | 10,55                     |                          | 94        | 1,70                  | 30             |
| 8          | 3,264         | 8,36                      |                          | 74        | 2,03                  | 24             |
| 9          | 2,906         | 6,63                      |                          | 58,9      | 2,56                  | 19             |
| 10         | 2,588         | 5,26                      |                          | 46,8      | 3,23                  | 15             |
| 11         | 2,305         | 4,17                      |                          | 32,1      | 4,07                  | 12             |
| 12         | 2,053         | 3,31                      |                          | 29,4      | 5,13                  | 9,5            |
| 13         | 1,828         | 2,63                      |                          | 23,3      | 6,49                  | 7,5            |
| 14         | 1,628         | 2,08                      | 5,6                      | 18,5      | 8,17                  | 6,0            |
| 15         | 1,450         | 1,65                      | 6,4                      | 14,7      | 10,3                  | 4,8            |
| 16         | 1,291         | 1,31                      | 7,2                      | 11,6      | 12,9                  | 3,7            |
| 17         | 1,150         | 1,04                      | 8,4                      | 9,26      | 16,34                 | 3,2            |
| 18         | 1,024         | 0,82                      | 9,2                      | 7,3       | 20,73                 | 2,5            |
| 19         | 0,9116        | 0,65                      | 10,2                     | 5,79      | 26,15                 | 2,0            |
| 20         | 0,8118        | 0,52                      | 11,6                     | 4,61      | 32,69                 | 1,6            |
| 21         | 0,7230        | 0,41                      | 12,8                     | 3,64      | 41,46                 | 1,2            |
| 22         | 0,6438        | 0,33                      | 14,4                     | 2,89      | 51,5                  | 0,92           |
| 23         | 0,5733        | 0,26                      | 16,0                     | 2,29      | 56,4                  | 0,73           |
| 24         | 0,5106        | 0,20                      | 18,0                     | 1,82      | 85,0                  | 0,58           |
| 25         | 0,4547        | 0,16                      | 20,0                     | 1,44      | 106,2                 | 0,46           |
| 26         | 0,4049        | 0,13                      | 22,8                     | 1,14      | 130,7                 | 0,37           |
| 27         | 0,3606        | 0,10                      | 25,6                     | 0,91      | 170,0                 | 0,29           |
| 28         | 0,3211        | 0,08                      | 28,4                     | 0,72      | 212,5                 | 0,23           |
| 29         | 0,2859        | 0,064                     | 32,4                     | 0,57      | 265,6                 | 0,18           |
| 30         | 0,2546        | 0,051                     | 35,6                     | 0,45      | 333,3                 | 0,15           |
| 31         | 0,2268        | 0,040                     | 39,8                     | 0,36      | 425,0                 | 0,11           |
| 32         | 0,2019        | 0,032                     | 44,5                     | 0,28      | 531,2                 | 0,09           |
| 33         | 0,1798        | 0,0254                    | 56,0                     | 0,23      | 669,3                 | 0,072          |

Retirado de: [http://www.if.ufrgs.br/~mittmann/tabela\\_de\\_fios.pdf](http://www.if.ufrgs.br/~mittmann/tabela_de_fios.pdf)



## ANEXO E: Ficha técnica do Filamento PM



### TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

### PLA FILAMENT

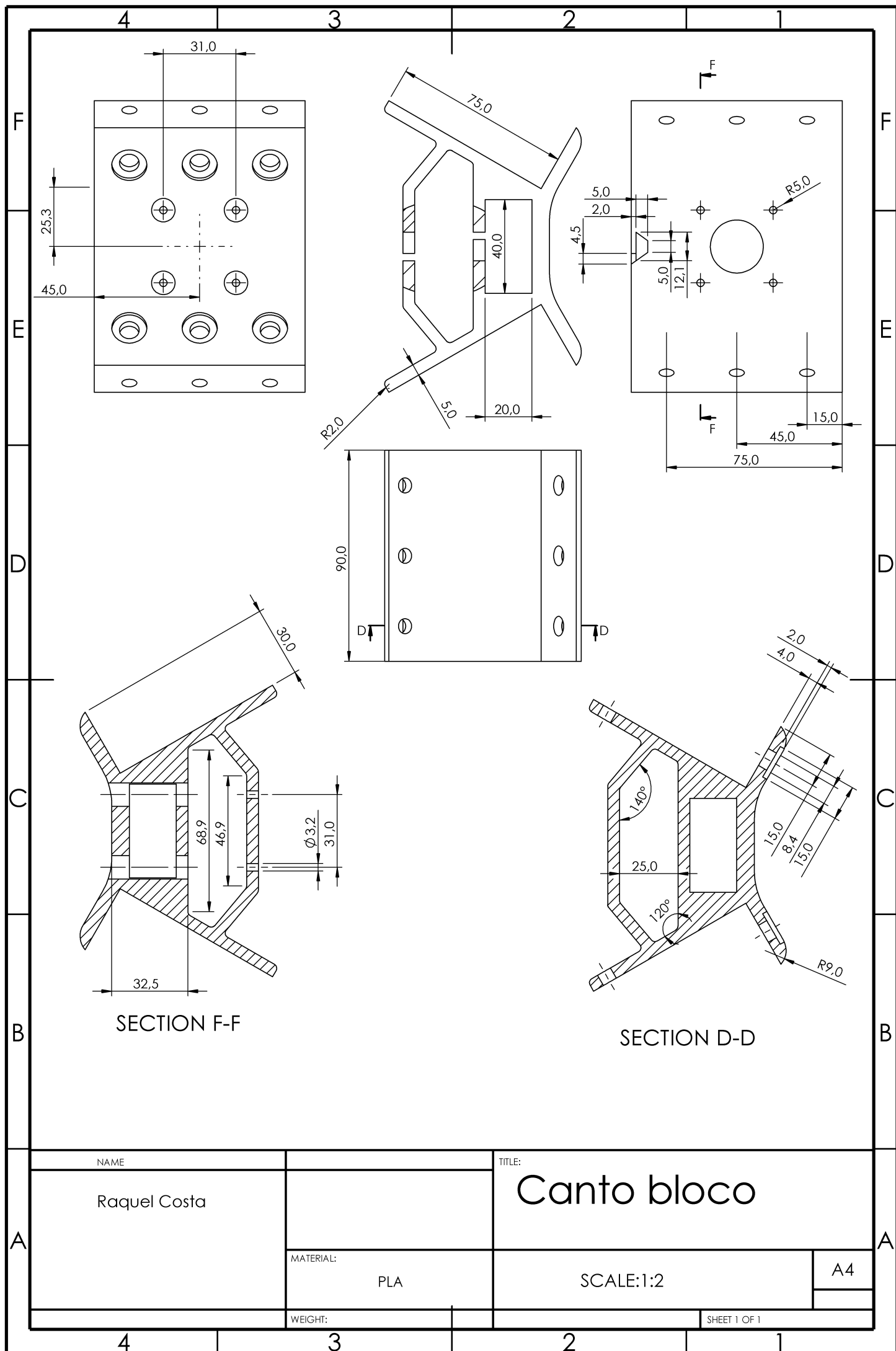
|                      |  |            |            |
|----------------------|--|------------|------------|
| Use                  | is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology                            |            |            |
| Material             | polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product             |            |            |
| Diameters            | 1,75 or 2,90 mm  |            |            |
| Tolerance            | ± 0,05 mm  |            |            |
| Weight               | 0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%   |            |            |
|                      | 1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%   |            |            |
|                      | 2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%   |            |            |
| Packing              | spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil                          |            |            |
| Colours              | views on web <a href="https://www.filament-pm.com/pla">https://www.filament-pm.com/pla</a> |            |            |
| Solvents             | 1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,  |            |            |
| Printing Properties: |  |            |            |
| Temperature HE       | 200 – 230 °C   |            |            |
| Temperature HB       | 20-60 °C   |            |            |
| Surface bed          | kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing  |            |            |
| Cooling print object | YES  |            |            |
| Nozzle               | All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more                               |            |            |
| Printer space        | Open / Close   |            |            |
| Material Properties: |  |            |            |
| Thermal              | vicat softening temperature  | ISO 306    | 55 °C      |
|                      | heat deflection temperature  | ISO 75     | 55 °C      |
| Mechanical           | impact strength  | ISO 179    | 16 kJ/m²   |
|                      | flexural modulus   | ISO 178    | 3500 MPa   |
| Physical             | Density  | ISO 1183/B | 1,24 g/cm³ |
|                      | Melt Flow Index  | ISO 1133   | 6 g/10 min |



## **ANEXO F: Alterações no bloco**

Bloco adaptado da dissertação de Joaquim Regadas





NAME

Raquel Costa

TITLE:

Canto bloco

MATERIAL:

PLA

SCALE:1:2

A4

WEIGHT:

SHEET 1 OF 1



## ANEXO G: Suporte de ecrã



Lista de peças:

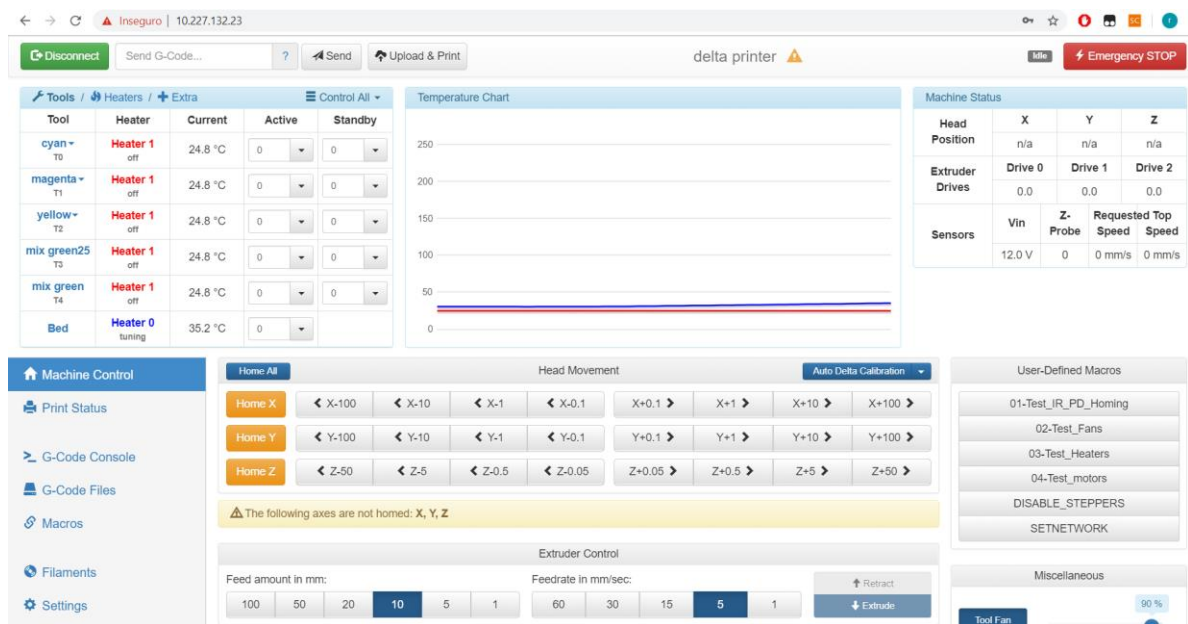
- 4 uni. Parafusos M3X20 mm
- 4 uni. parafusos M3X10 mm
- 8 uni. porcas M3

Suporte de ecrã retirado de <https://www.thingiverse.com/thing:2799628>

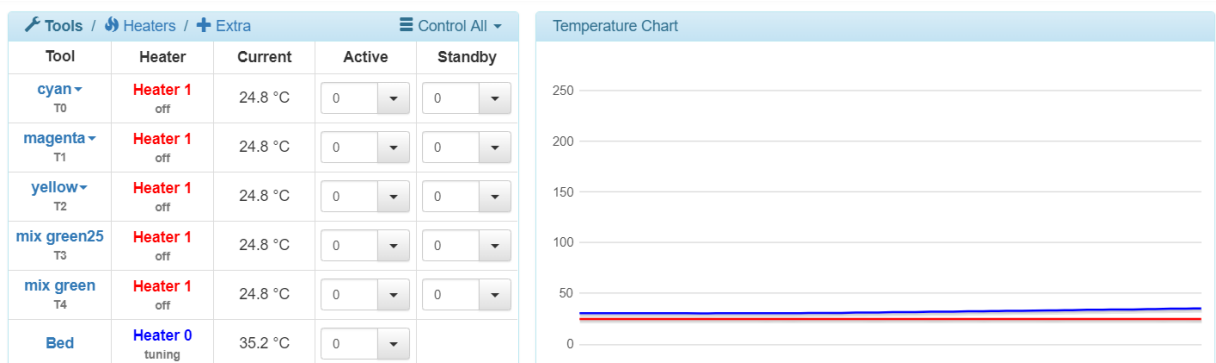


## ANEXO H: Interface de trabalho da DUET

### Interface inicial da impressora



### Controlo da temperatura do extrusor e da base de impressão aquecida



Janela indicadora de posição, de filamento extrudido de cada um dos filamentos e estado dos sensores.

| Machine Status  |         |         |                     |        |
|-----------------|---------|---------|---------------------|--------|
| Head Position   | X       | Y       | Z                   |        |
|                 | n/a     | n/a     | n/a                 |        |
| Extruder Drives | Drive 0 | Drive 1 | Drive 2             |        |
|                 | 0.0     | 0.0     | 0.0                 |        |
| Sensors         | Vin     | Z-Probe | Requested Top Speed | Speed  |
|                 | 12.0 V  | 0       | 0 mm/s              | 0 mm/s |

### Machine control: Movimentação da impressora

Machine Control
Print Status
G-Code Console
G-Code Files
Macros
Filaments
Settings

Home All

Head Movement

Auto Delta Calibration

Home X
X-100 X-10 X-1 X-0.1 X+0.1 X+1 X+10 X+100

Home Y
Y-100 Y-10 Y-1 Y-0.1 Y+0.1 Y+1 Y+10 Y+100

Home Z
Z-50 Z-5 Z-0.5 Z-0.05 Z+0.05 Z+0.5 Z+5 Z+50

The following axes are not homed: X, Y, Z

Extruder Control

Feed amount in mm: 100 50 20 10 5 1
Feedrate in mm/sec: 60 30 15 5 1
Retract Extrude

### Print Status: Controlo do estado de impressão e correção de alguns parâmetros

Print Control
Pause Print
Enable Auto-Sleep

Z Baby Stepping
Current Offset: 0 mm
-0.05 mm +0.05 mm

File Information
Size: n/a
Object Height: n/a
Layer Height: n/a
Filament Usage: n/a
Generated by: n/a

Layer Statistics

Collected Data
Warm-Up Time Current Layer Time Last Layer Time Print Duration
n/a n/a n/a n/a

Estimations
Based on Filament Usage File Progress Layer Time
Time Left n/a n/a n/a
Est. End Time n/a n/a n/a

Fan Control

Tool Fan 90 %
Fan 1 90 %

Speed Factor

100 %

Extrusion Factors

Extruder 0: 100 %
Extruder 1: 100 %
Extruder 2: 100 %

## Machine settings: Alteração das configurações da impressora

General
User Interface
List Items
System Editor
Machine Properties
Tools

Software Information

**Firmware Name:** RepRapFirmware for Duet 2 WiFi/Ethernet  
**Firmware Electronics:** Duet Ethernet 1.02 or later + DueX5  
**Firmware Version:** 2.01(RTOS) (2018-07-26b2)  
**Web Interface Version:** 1.21.2-dc42  
Web Interface by [Christian Hammacher](#)  
Licensed under the terms of the [GPL v3](#)

File Upload for /sys and /www Directories

Here you can upload firmware, Duet WiFi and Duet Web Control files as well

Communication

☒ Connect automatically  
Status Update Interval:  
 ms  
Extended Status Update after every:  
 th response  
Maximum number of AJAX retries:

Reconnect Preferences

Reconnect Delay on Halt:  
 s  
Reconnect Delay on Firmware Update:  
 s